

UNIVERSITATEA „ȘTEFAN CEL MARE” DIN SUCEAVA
DOMENIUL DE STUDIU GEOGRAFIE

TEZĂ DE DOCTORAT

*Reconstituirea temperaturii aerului din
ultimii 1000 de ani pe baza analizei
izotopilor stabili din depozitele de gheață din
peșterile din Munții Apuseni, România*

Doctorand:

Carmen – Andreea Bădăluță

Coordonator științific:

Prof. univ. dr. Maria Rădoane

Suceava, 2019



Investește în oameni !

FONDUL SOCIAL EUROPEAN

Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

Această lucrare a beneficiat de suport financiar prin proiectul

Doctorat European de Calitate – ”EURODOC”

Nr. identificare contract: **POSDRU/187/1.5/S/155450**

Axa prioritară 1 “Educația și formarea profesională în sprijinul creșterii economice în dezvoltarea societății bazate pe cunoaștere”

Domeniu major de intervenție 1.5 “Programe doctorale și post-doctorale în sprijinul cunoașterii”

De asemenea, această lucrare a beneficiat de suport financiar prin proiectele:

1. 18 SEE - *Forest response to climate change predicted from multicentury climate proxy-records in the Carpathian region*, finanțat de EEA Grants (European Economic Area Financial Mechanism).
2. PNII-RU-TE-2014-4-1993 - *Factori de control naturali și culturali ai expansiunii Neolitice in SE Europei* (contract nr. 139/1 octombrie 2015), finanțat de UEFISCDI
3. CTR 790/2014 *Quantification of the climate – speleothem stable isotopes relationships on a W-E European transect*, finanțat de UEFISCDI
4. IAEA 18452, *Water stable isotope study of the climate-river discharge relationship(s) in the Lower Danube Watershed*, finanțat de Agentia Internationala pt Energie Atomica
5. *Cave ice microbiom: metabolic diversity and activity in response to climate dynamics and anthropogenic pollution*, finanțat de UE prin programul ERANET-LAC

SUMAR

1. INTRODUCERE	7
1.2. Scopul, obiectivele și structura lucrării	9
2. IZOTOPII STABILI – INDICATORI PROXY PENTRU TEMPERATURĂ	10
3. PEȘTERILE CU GHEAȚĂ.....	11
4. MATERIALE ȘI METODE	13
5. FACTORII DE CONTROL AI PARAMETRILOR CLIMATICI LA SCARĂ SEZONIERĂ ÎN PERIOADA INSTRUMENTALĂ	16
6. RECONSTITUIREA TEMPERATURII AERULUI DIN ULTIMII 1000 DE ANI PE BAZA ANALIZEI IZOTOPILOR STABILI DIN DEPOZITELE DE GHEAȚĂ DIN PEȘTERI	17
7. RELAȚIA CLIMAT – SOCIETATE ÎN ULTIMII 500 DE ANI	23
CONTRIBUȚII PERSONALE	26
BIBLIOGRAFIE	27

CUPRINS

Capitolul 1 – Introducere

- 1.1 Argument
- 1.2 Scopul, obiectivele și structura lucrării

Capitolul 2 - Izotopii stabili – indicatori proxy pentru temperatură

- 2.1 Izotopii stabili – definiții, concepte și importanța acestora
- 2.2 Fraționarea izotopică
- 2.3 Parametru d-excess și Linia Meteorică a Apei
- 2.4 Factorii care determină compoziția izotopică în apa de precipitații
- 2.5 Transmiterea semnalului climatic din precipitații în gheață
 - 2.5.1 Transferul semnalului climatic în calote glaciare
 - 2.5.2 Transferul semnalului climatic în ghețarii de tip alpin
 - 2.5.3 Transferul semnalului climatic în gheața subterană (peșteri cu gheață)

Capitolul 3 - Peșterile cu gheață

- 3.1. Peșterile cu gheață și rolul acestora în reconstituirile paleoclimatice
 - 3.1.1 Cadrul teoretic
 - 3.1.2 Context internațional
 - 3.1.2.1. Istoricul cercetărilor în perioada AD 1200 – 1800
 - 3.1.2.2. Istoricul cercetărilor în perioada AD 1800-1950
 - 3.1.2.3. Istoricul cercetărilor în perioada AD 1200 – 1800
 - 3.1.3 Context național
 - 3.1.3.1. Peștera Ghețarul de la Scărișoara
 - 3.1.3.2. Peștera Focul Viu
 - 3.1.3.3. Avenul Borțig
- 3.2 Zona de studiu
 - 3.2.1 Cadrul general
 - 3.2.2 Siturile de studiu
 - 3.2.2.1 Peștera Ghețarul de la Scărișoara
 - 3.2.2.2 Peștera Focul Viu

Capitolul 4 – Metode și materiale

- 4.1 Metode și tehnici utilizate în teren
 - 4.1.1 Determinarea locului de carotare
 - 4.1.2 Prelevarea carotelor de gheață
 - 4.1.3 Metode complementare
 - 4.1.3.1 Colectarea probelor de apă din precipitații
 - 4.1.3.2 Instalarea senzorilor de temperatură și umiditate
- 4.2 Metodele și tehnicile utilizate în laborator
 - 4.2.1 Secționarea carotelor de gheață
 - 4.2.2 Dezghețarea și filtrarea probelor
 - 4.2.3 Analiza compoziției izotopice a apei
 - 4.2.4 Analiza compoziției izotopice a calcitului criogenic

- 4.2.5 Identificarea morfologiei calcitului criogenic
- 4.2.6 Metoda de datare cu radiocarbon ^{14}C
- 4.3 Metode statistice
 - 4.3.1 Metode statistice necesare pentru analiza teleconexiunilor
 - 4.3.2 Metode de determinare a evenimentelor extreme
 - 4.3.3 Determinarea surselor de umiditate
 - 4.3.4. Standardizarea datelor
- 4.4 Analiza cartografică
- 4.5 Baze de date utilizate

Capitolul 5 - Factorii de control ai parametrilor climatici la scară sezonieră în perioada instrumentală

- 5.1 Fondul de date
- 5.2. Caracterizarea principalelor elemente climatice ce controlează ghețarii subterani
 - 5.2.1. Temperatura aerului
 - 5.2.2. Temperatura solului
 - 5.2.3. Precipitațiile atmosferice
- 5.3. Caracteristici ale variabilității temperaturii medii și a cantității de precipitații din timpul iernii în România în legătură cu principalele configurații de teleconexiuni din Emisfera Nordică
 - 5.3.1. Oscilația Nord Atlantică (NAO)
 - 5.3.2. Configurația Atlanticului de Est (EA)
 - 5.3.3. Oscilația Arctică
 - 5.3.4. Configurația Atlanticului de Est și Vestul Rusiei (EA-WR)
 - 5.3.5. Configurația Scandinavă (SCA)
 - 5.3.6. Configurația Polar-Eurasiatică (POL)
 - 5.3.7. Oscilația Multidecadală Atlantică (AMO)

Capitolul 6. Reconstituirea temperaturii aerului din ultimii 1000 de ani pe baza analizei izotopilor stabili din depozitele de gheață din peșteri

- 6.1 Compoziția izotopică din precipitații
- 6.2 Reconstituirea temperaturii aerului din timpul iernii pe baza depozitului de gheață din Peștera Ghețarul de la Scărișoara
 - 6.2.1 Cronologia depozitului de gheață
 - 6.2.2 Rata de acumulare
 - 6.2.3 Izotopii stabili din Ghețarul de la Scărișoara – indicator proxy pentru temperatura aerului din timpul ierii ani
- 6.3. Reconstituirea temperaturii aerului din timpul verii pe baza depozitului de gheață din Peștera Focul Viu
 - 6.3.1 Cronologia/vârsta depozitului de gheață
 - 6.3.2 Rata de acumulare
 - 6.3.3 Izotopii stabili în Peștera Focul Viu – indicator proxy pentru temperatura aerului din timpul verii
- 6.4. Calcitul criogenic – nou indicator proxy pentru reconstituirea temperaturii aerului
 - 6.4.1. Introducere
 - 6.4.2. Formarea calcitului criogenic și tipologia acestuia
 - 6.4.3 Morfologia calcitului criogenic
 - 6.4.4 Izotopii stabili ai calcitului criogenic sub formă de pudră – indicator proxy pentru temperatură

Capitolul 7 – Relația climat - societate în ultimii 500 de ani

7.1 Introducere

7.2 Reconstituirea pe termen lung a extremelor hidroclimatice

7.2.1 Analiză anuală

7.2.2 Analiză sezonieră

7.3 Reconstituirea pe termen lung a vulnerabilității sociale

Concluzii

Contribuții personale

Bibliografie

Anexe

CUVINTE CHEIE

Peșteri cu gheață, depozite de gheață, izotopi stabili, reconstituirea temperaturii aerului, circulație atmosferică, Munții Apuseni, ultimul mileniu, impact social.

1. INTRODUCERE

”... ice contains no future, just the past, sealed away ... clear and distinct!

(Haruki Murokami, 1995)

Reconstituirile climatice au fost, sunt și vor rămâne o provocare în domeniul cercetării științifice datorită limitărilor spațiale de eșantionare, precum și al metodelor și modelelor utilizate în integrarea indicatorilor proxy (Hughes și Ammann, 2009; Jones et al., 2009). În contextul schimbărilor climatice în curs de desfășurare, o atenție specială a fost acordată reconstrucției variabilității climatice din timpul mileniului trecut (Crowley, 2000), care ar conduce la o înțelegere mai bună a cauzelor și consecințelor influenței activității umane asupra mediului; totodată, ar duce la definirea unor posibilități de atenuare și/sau de adaptare la efectele schimbării (IPCC, 2014). În efortul global de cunoaștere a paleoelentelor climatice, cele mai multe dintre aceste studii s-au concentrat asupra reconstituirii temperaturii (majoritatea dintre ele pe timpul verii sau a temperaturii anuale) și într-o măsură mai mică de reconstituire a precipitațiilor (Charman, 2012). Spațial, există o multitudine de informații din întreaga regiune a Atlanticului de Nord, în special din Europa de Vest și Centrală (Corella, 2013; Andrews, 2014), dar mult mai puține pentru zona Europei de Est.

În Europa Central - Estică (inclusiv teritoriul României), interacțiunile dintre influențele Atlanticului de Nord, Mării Mediteraneene și cele Estice din Siberia determină un model complex de variabilitatea climatică (Busuioc et al. 2010), în special în ceea ce privește cantitățile de precipitații și distribuția acestora. În timp ce majoritatea studiilor care vizau variabilitatea climatică din trecut în regiunea de studiu s-au concentrat pe temperatura aerului (Popa et al., 2009, Feurdean et al., 2011, Perșoiu et al., 2017), cantitatea de precipitații a fost într-o oarecare măsură neglijată, fiind de obicei mult mai dificil de reconstituit.

Cunoașterea variabilității climatice din trecut este cu atât mai importantă cu cât măsurătorile instrumentale nu acoperă în totalitate un secol și jumătate (Fig.1), acestea fiind doar imaginea evoluției activităților umane (Jones et al., 2001). Totuși, pentru a putea analiza evoluția paleoclimatului va trebui să luăm în calcul măsurătorile instrumentale care au capacitatea de a valida diverși indicatori proxy (Mann, 2002) cu diferite rezoluții, deși cele mai lungi serii de timp din Emisfera Nordică datează doar din 1659 (Anglia), pe când la nivelul României acestea nu acoperă decât ultimul secol.

Pentru a extinde baza de date înregistrate de stațiile instrumentale (care de cele mai multe ori sunt mai scurte de 100 de ani) trebuie să ne bazăm pe indicatorii proxy înregistrați de ghețari, sedimente marine / lacustre, inelele arborilor, speleoteme, varve, corali. Totuși, multe din aceste arhive de mediu sunt limitate, acestea putând înregistra fie semnalul climatic de vară sau de iarnă, astfel că se impune o cunoaștere a magnitudinii și impactului variabilității climatului din prezent asupra acestor semnale.

În zona temperată, una dintre cele mai sensibile arhive de mediu pentru a reconstrui impactul schimbărilor climatice pe termen scurt și mediu sunt peșterile de gheață (Homlund et al., 2005), în fapt peșterile modelate în rocă, dar care adăpostesc acumulări perene de gheață. În astfel de peșteri, gheața este depozitată sub formă de straturi de apă înghețată, care înregistrează compoziția izotopică originală a precipitațiilor (Perșoiu et al., 2011) și reflectă modificările temperaturii aerului

(Dansgaard, 1964). Timpul de reîncărcare a apei în peșteri conduce la identificarea diferitelor "istorii de temperatură", acestea fiind prinse în arhivele înghețate.

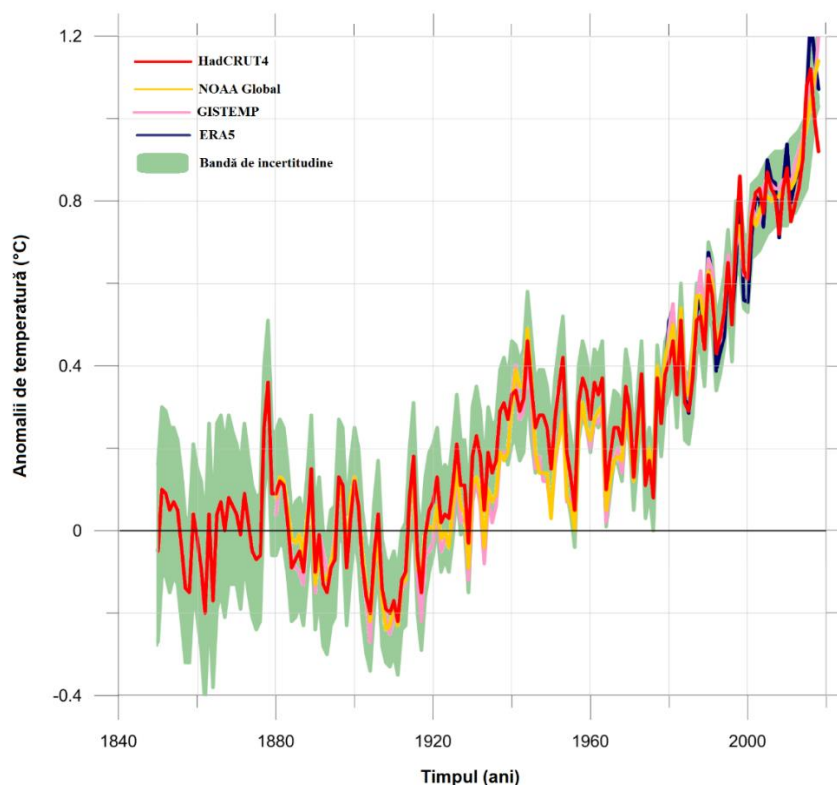


Fig. 1. Anomaliile globale de temperatură în perioada 1850 - 2018, conform HadCRUT4 (Morice et al., 2012), GISTEMP (Hansen et al., 2010), ERA5 (Copernicus Copernicus Climate change Service) și NOAA Global Temp (Karl et al., 2015).

În regiunea noastră de studiu, existența unor depozite de gheață perenă din peșteri au deschis o nouă cale de cercetare prin obținerea de informații paleoclimatice cu o gamă largă de potențiali indicatori indirecti (izotopi stabili în gheață și în calcit criogenic, polen, inelele anuale ale arborilor prinși în gheață, grosimea stratului de gheață, etc).

Lucrarea de doctorat cuprinde o viziune complexă a variațiilor climatice pe termen lung surprinse de izotopii stabili de oxigen și hidrogen din depozitele de gheață subterane, pe baza mecanismul de transfer climatic (din precipitații în gheață), la cel de acumulare și, ulterior la răspunsul blocurilor de gheață la modificările climatice. Mai mult, identificarea calcitului criogenic din două carote și analiza izotopilor stabili de oxigen și carbon au adus un plus de informație la reconstituirea paleoclimatului din ultimul mileniu. Pe lângă aceste aspecte principale, studiul aduce noi informații cu privire la metodele moderne de cercetare, factorilor de control ai parametrilor climatici la scară sezonieră, dar și investigarea relației climat-societate în partea Central Estică a Europei. De remarcat că o asemenea abordare metodologică și de interpretare este o premieră în cercetarea paleoclimatică din România într-o teză de doctorat.

În acest context, ne propunem să obținem o reconstituire de mare rezoluție, a schimbărilor de temperatură în NV României pe baza izotopilor stabili, care să completeze datele similare, deja existente, din Munții Apuseni (Tămaș et al., 2005; Perșoiu et al., 2011; Perșoiu et al., 2017) și Munții Banat (Constantin et al., 2007; Drăgușin et al., 2014). Rezultatele astfel obținute vor permite înțelegerea rolului condițiilor locale în variabilitatea paleoclimatică, teleconexiuni cu rezultate similare în Europa Centrală și de Vest și cel mai important în ceea ce ne privește o utilizare a acestora pentru reconstituirea impactului asupra societății în perioada AD 1500 - 2015 în regiunea carpatică.

1.2.Scopul, obiectivele și structura lucrării

Schimbările climatice reprezintă o problemă intens discutată în ultimul timp, careia i se acordă o deosebită importanță în studiile paleoclimatice, deoarece întreg sistemul Terrei (atât natural, cât și socio-economic) este afectat de aceste schimbări (IPCC, 2007).

Pentru **identificarea schimbărilor climatice** survenite în trecut, cât și pentru **posibilitatea prognozării** acestora pe viitor studiul de față s-a concentrat pe analiza a două blocuri de gheață perenă, subterană **Peștera Ghețarul de la Scărișoara și Peștera Focul Viu**.

La nivelul anului 2014 (începutul studiilor doctorale), studii detaliate cu privire la climatul ultimilor 1000 de ani în România erau oarecum sporadice. Majoritatea celor existente s-au ocupat de reconstituiri pe perioade mai mari (de exemplu, Holocen), sau dimpotrivă pe analiza climatului din timpul perioadei instrumentale (aproximativ ultimii 150 de ani). Studiile respective au un potențial ridicat atât din punct de vedere calitativ cât și cantitativ, stând mereu la baza reconstituirilor paleoclimatice actuale din această regiune. Dintre acestea, le amintim pe cele de potențial paleoclimatic care fac referire strictă la depozitele de gheață din Peștera Ghețarul de la Scărișoara (Pop, 1950; Holmlund et al., 2005; Feurdean et al., 2011; Perșoiu et al. 2011a; Perșoiu et al. 2011b; Perșoiu et al., 2017), Peștera Focul Viu (Fórizs et al., 2004; Kern et al., 2004; Citterio et al., 2008; Maggi et al., 2008) și Avenul Bortig (Kern et al., 2009; Kern et al. 2010). Pe lângă acestea la nivel regional mai pot fi luate în calcul studiile de paleoclimă care fac referire la spațiul carpatic determinate pe baza speleotemelor (Onac et al., 2002; Drăgușin et al., 2014; Drăgușin et al., 2017), depozitelor de guano (Forray et al., 2014, Onac et al., 2015; Cleary et al., 2017), sedimentelor lacustre (Feurdean et al., 2015; Florescu et al., 2017; Haliuc et al., 2017), inelele arborilor (Popa et al., 2009; Popa și Bouriand, 2014), turbării (Fărcaș et al., 2013; Cristea et al., 2013; Tanțău et al., 2014), cu sedimente de albie ca arhive fluviale (Rădoane et al., 2015; Rădoane et al., 2018), paleoinundații (Perșoiu și Perșoiu, 2019) sau regimul de îngheț al râurilor (Ioniță et al., 2018).

Pornind de la ideea posibilității creșterii rezoluției cronologice ale variațiilor climatice din ultimul mileniu **scopul** studiului este cel de **reconstituire a variabilității climatului din ultimul mileniu, pe baza metodelor moderne geocronologice**. Astfel, datările cu radiocarbon (^{14}C), izotopii de oxigen și hidrogen din gheață, izotopii de oxigen și carbon din calcitul criogenic și datele documentare și instrumentale au condus la **identificarea mecanismului de transfer climatic, a răspunsurilor oferite de indicatorii proxy din ghețarii subterani la schimbările climatice și la înțelegerea relației climat - societate**.

Având în vedere toate cele menționate anterior, principalele **obiective** ale lucrării sunt:

- i) introducerea în geochimia izotopilor stabili și rolul acestora în Științele Pământului;
- ii) explicarea detaliată a procesului de transfer climatic din precipitații în gheața perenă din peșterile din Munții Apuseni;
- iii) determinarea factorilor de control ai parametrilor climatici la scară sezonieră și explicarea legăturii cu principalele configurații de teleconexiuni la nivelul Emisferei Nordice;
- iv) determinarea ratei de acumulare a depozitelor de gheață și identificarea mecanismelor care au stat la baza acestui proces;
- v) creionarea profilelor izotopice, atât cel din gheață, cât și al calcitului criogenic, acestea fiind suportul de bază al reconstituirilor de temperatură și variațiilor acesteia de-a lungul ultimului mileniu la nivel regional;
- vi) compararea semnalului climatic înregistrat de indicatorii proxy din depozitele glaciare subterane aferente Peșterii Ghețarului de la Scărișoara și Peșterii Focul Viu din Munții Apuseni cu alte tipuri de arhive, atât din România cât și din Europa.
- vii) determinarea relației climat - societate în ultimii 500 de ani în spațiul intra și extra-carpatic, luând în calcul documentele istorice și măsurătorile instrumentale.

2. IZOTOPII STABILI – INDICATORI PROXY PENTRU TEMPERATURĂ

Izotopii stabili sunt părți componente ale aceleiași atom, aceștia fiind alcătuiți din nuclee care au în componența sa același număr de protoni, dar cu numere diferite de neutroni, fapt pentru care și masa atomică a acestora este diferită (Gaiță, 2007; Sharp, 2007, 2017).

Oxigenul și hidrogenul sunt elementele fundamentale ale moleculei de apă, elemente care prezintă minim doi izotopi stabili: hidrogenul (^1H și ^2H) și oxigenul (^{16}O , ^{17}O și ^{18}O). Hidrogenul prezintă trei izotopi: protiul, deuteriu și tritiu. Izotopul de hidrogen denumit deuteriu prezintă un neutron și un proton. Diferența dintre cei trei izotopi ai hidrogenului este dată de numărul de neutroni și masa acestora, astfel că protiul (^1H) are masa de două ori mai mică decât cea a deuteriului (^2H) și de trei ori mai mică decât masa tritiului (^3H). Abundența naturală a ^1H este de 99,985% și de 0,015% pentru ^2H . Aceeași ”regulă” de diferențiere se impune și pentru izotopii de oxigen, încât toți aceștia au câte 8 protoni, dar neutroni diferiți. În acest caz, izotopul cu masa 18 (notat ^{18}O) prezintă cu doi neutroni mai mult decât izotopul cu masa 16 (notat ^{16}O) (Kendall, 1998). Abundența cea mai mare a oxigenului este dată de ^{16}O cu 99,759, pe când ^{17}O și ^{18}O este de 0,037 % și 0,20 %. (Sharp, 2007, 2017; Bădăluță, 2014).

În cazul carbonaților, respectiv calcitului criogenic elementele principale sunt *carbonul* și *oxigenul*. Carbonul prezintă 2 izotopi stabili, respectiv ^{12}C (cu șase protoni și 6 neutroni) și ^{13}C (cu șase protoni și 7 neutroni). Izotopul ^{12}C are o abundență naturală de 98.89%, pe când izotopul ^{13}C doar 1.11%.

Astfel, analiza compoziției izotopice este reprezentat de raportul dintre izotopii stabili cu masă mai mare și cei cu masă mai mică (de exemplu $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$ sau $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$), utilizând diferența relativă δ dintre raportul izotopic al probei și raportul unui standard de referință, cu o compoziție știută și exprimat în ‰ (Gaiță, 2007; Sharp 2007):

$$\delta x = \left(\frac{R_x - R_{std}}{R_{std}} \right) * 1000 \text{ (‰)} \quad (1)$$

unde, x este elementul analizat (ex: oxigen, hidrogen, carbon), R_x - raportul elementului analizat (ex: $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$) și R_{std} – raportul unui element la un standard intențional.

În pofida multiplelor procese ce acționează în cadrul circuitului apei în natură presiunile relative de vapori ale izotopilor de hidrogen și oxigen ale apei variază în mod firesc, natural, determinând relația liniară care definește linia de apă meteorică globală (GMLW).

Pe lângă procesul de fracționare există și alți factori care determină compoziția izotopică a precipitațiilor. Variațiile compoziției izotopilor stabili apar atât în cazul perioadelor lungi de timp, între anotimpuri și chiar în timpul unei singure furtuni (Sharp, 2017). Factorii care determină compoziția izotopică sunt temperatura aerului, efectul de continentalism, altitudinea și latitudinea.

Datorită măsurărilor efectuate cu ajutorul izotopilor stabili s-au putut rezolva și răspunde la diverse probleme cu privire la Științele Pământului, ale omului, biologice sau chimice. În urma acestora s-au stabilit 4 tipuri majore de aplicații în Științele Pământului, după cum urmează:

□ *Termometrie* – termometria izotopilor stabili joacă un rol deosebit în studiile paleoclimatice, deoarece formarea rocilor, mineralelor și a sistemelor de gaze sunt determinate de procesul de fracționare, care este dependent de temperatură.

□ *Trasori* – Izotopii stabili pot fi utilizați ca trasori de origine pentru roci, fluide, plante, deoarece marile rezervoare de apă precum mările și oceanele, apa metorică, compușii din care este alcătuită mantaua și materia organică prezintă o anumită compoziție a izotopilor stabili.

□ *Reacția mecanismelor* – diferențele pot fi făcute între procesul de difuzie și cel de recristalizare ale sistemelor închise și deschise, între procesul bacterial și cel termogenic.

□ *Paleoclimatologie* – compoziția izotopilor stabili din minerale, fluide sau gaze prezintă informații importante cu privire la condițiile din trecut.

3. PEȘTERILE CU GHEAȚĂ

Relieful montan din Emisfera Nordică (Europa, Asia și America de Nord) adăpostește un număr ridicat de peșteri în care se dezvoltă ghețari subterani, aceștia fiind mai puțin cunoscuți la nivelul criosferei. Depozitele de gheață subterană apar acolo unde morfologia peșterii și condițiile climatice sunt favorabile dezvoltării proceselor glaciare și persistenței lor în timp (Peșoiu și Lauritzen, 2018). Procesele glaciare din peșteri pot lua naștere indiferent de altitudinea sau tipul rocii în care este formată peștera, acestea fiind controlate îndeosebi de factorul climatic și cel hidrologic. Majoritatea peșterilor în care iau naștere imense blocuri de gheață se găsesc cu precădere în zonele temperate și cu permafrost, acestea formându-se în zona heterodinamică, în imediata apropiere de intrarea în peșteră, acolo unde temperatura prezintă oscilații sezoniere (Luetscher, 2004).

În ceea ce privesc condițiile formării ghețarilor subterani în climatul temperat, studiul lui Silvestru (1999) evidențiază două mecanisme fundamentale în procesul de răcire a unei peșteri la temperaturi scăzute, puse pe baza *temperaturii medii multianuale pozitive a rocii și al aportului de apă din peșteră* (necesară în formarea gheții).

Principalele mecanisme ale procesului de îngheț sunt puse pe seama *captării și diagenzei zăpezii în peșteră, înghețului apei, acumulării aerului rece și ventilației* (efectul fumului de coș) peșterii. (Silvestru, 1999, Peșoiu și Onac, 2012).

Formarea și acumularea depozitelor de gheață subterane sunt determinate de o serie de factori interdependenți care acționează la nivelul cavității. Dintre aceștia amintim factorii climatici (atât cel din interiorul peșterii, cât și cel de la exteriorul peșterii), hidrologici, dar și cei litologici și geomorfologici. Astfel, Mavlyudov (2018) delimitează condițiile ce determină formarea gheții în peșteri în două categorii:

1. principale, controlate de (a) diferența dintre temperatura rocii și temperatura de la exterior; (b) forma cavității, (c) rezerva de aer rece din cavitate și (d) intrarea de apă în peșteră;
2. secundare, determinate de influențele elementelor climatice – presiune, umiditatea aerului, radiația solară, vânturile, etc, structura cavității, proprietățile termo-fizice ale rocii, condițiile geomorfologice din jurul peșterii, prezența vegetației.

O condiție esențială în acumularea gheții perene subterane este ca temperatura medie multianuală din peșteră să fie sub 0°C (Silvestru, 1999; Peșoiu și Pazdur, 2011; Peșoiu și Onac, 2012; Luetscher, 2013), distribuția temperaturii fiind controlată de fluxul adectiv de apă și al circulației aerului (Luetscher și Jeannin, 2004). De asemenea, un rol important în acumularea gheții îl reprezintă morfologia peșterii (Luetscher și Jeannin, 2004; Mavlyudov, 2008).

Acumularea depozitului de gheață se realizează conform principiului superpoziției stratelor. Pe baza acestui principiu primul strat de la partea superioară al depozitului de gheață prezintă grosimea cea mai mare și este cel mai recent depus, iar cel de la bază prezintă o grosime mai mică și este cel mai vechi.

Luând în calcul multitudinea de informații arhivate de depozitele de gheață subterane, indiferent de natura lor (gheață sau firn) putem afirma că peșterile cu gheață perenă pot fi utilizate în analiza reconstituirilor paleoclimatice și de paleomediul, prezentând în mare parte caracteristicile arhivelor înglobate de ghețarilor alpini sau de calotă. Astfel, analizând carotele de gheață extrase din peșteri se pot determina principalele surse de informații paleoclimatice, respectiv: temperatura aerului, sursa de umiditate, acumularea netă, circulația / compoziția atmosferică, erupții vulcanice, activitate solară, dinamica vegetație, poluare, activități antropice

Zona de studiu se suprapune părții nordice a Carpaților Occidentali, aceasta incluzând partea central – vestică din Munții Bihorului. Arealul de investigație este caracterizat prin relieful carstic (Posea, 2002) și include două situri de studiu reprezentative pentru Masivul Bihor și Platoul Padișului, respectiv, ghețarii din Peștera Scărișoara și Peștera Focul Viu (Fig. 2).

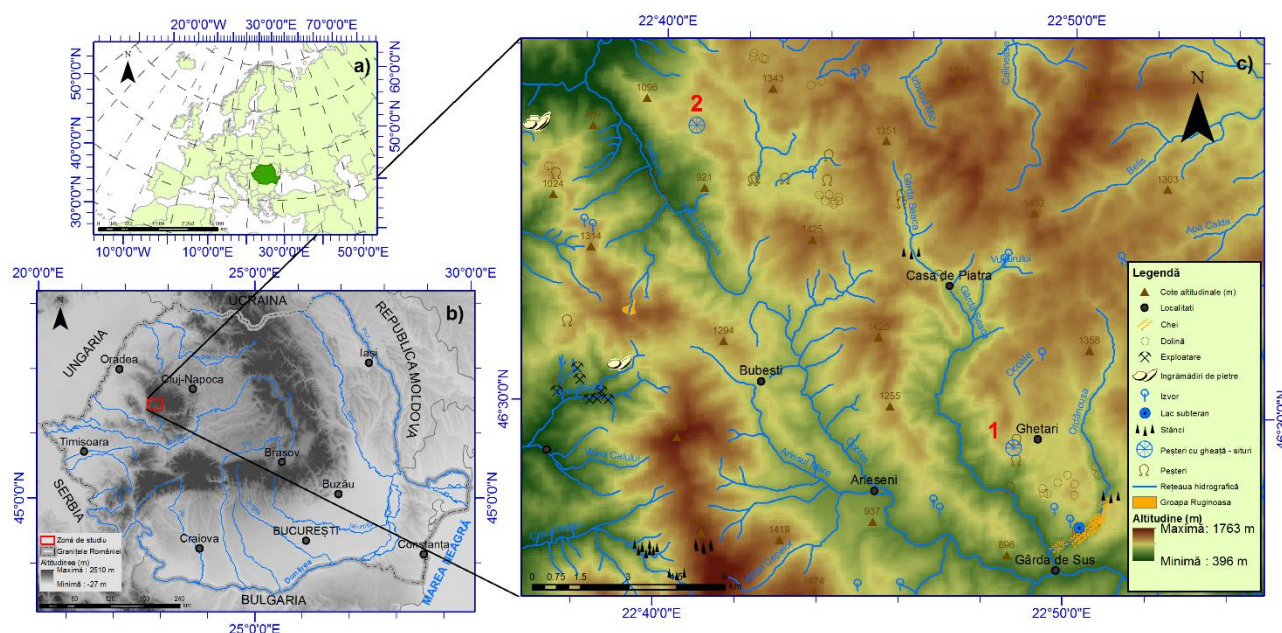


Fig.2. Localizarea zonei de studiu în: a) Europa, b) România și c) în cadrul Munților Bihor. Siturile de studiu sunt evidențiate pe harta hipsometrică (Fig. 3.1c), cu cifre roșii, astfel cifra 1 este Peștera Ghețarul de la Scărișoara și 2 – Peștera Focul Viu.

În vederea elaborării acestei lucrări s-au luat în considerare două peșteri cu gheață perenă, respectiv:

1. Peștera Ghețarul de la Scărișoara - peștera cu cel mai mare volum de gheață perenă la nivel global (Holmlund, 2005);
2. Peștera Focul Viu – a doua peșteră cu gheață perenă din România (Citterio et al., 2005), ambele fiind fiind clasificate ca arii naturale protejate de categorie A și B (zona turistică din Peștera Ghețarul de la Scărișoara), conform articolului numărul 31 din Ordonanța de urgență a Guvernului nr. 236/2000 privind regimul ariilor naturale protejate, conservarea habitatelor naturale, a florei și faunei sălbatice. Principalele caracteristici ale siturilor de studiu sunt redată în Tabelul 1.

Tabelul 1. Date generale cu privire la siturile de studiu

Denumirea sitului	Localizare geografică	Date generale	Tipul sitului	Tipul rocii în care s-a dezvoltat peștera	Indicatori analizați în gheață
Peștera Ghețarul de la Scărișoara	46°29' 24"N 22°48' 43"E	Altitudine: 1165m Denivelare: 105m Lungime: 700m Volum gheții: 100000m ³ Vârsta gheții: 10500 ani	fosil	Calcare jurasice	Polen $\delta^{18}\text{O}$ și $\delta^2\text{H}$ microbiologie geochimie calcit criogenic
Peștera Focul Viu	46°34' 83"N 22°40' 45"E	Altitudine: 1165m Denivelare: Lungime: 107m Volum gheții: 25000 m ³ Vârsta gheții: 2500 ani	fosil	Calcare jurasice	$\delta^{18}\text{O}$ și $\delta^2\text{H}$ geochimie ¹⁴ C

4. MATERIALE ȘI METODE

Acumulările de gheață din calote, ghețari (Bradley, 2014) sau peșteri (Citterio et al. 2004; Holmlund et al. 2005; Kern și Perșoiu, 2013) reprezintă adevărate arhive de înregistrări posibile ale paleoclimatului și paleomediului. Datorită numărului ridicat de indicatori proxy¹ ce pot fi extrași analizând carotele de gheață, acestea combină o serie de metodologii și tehnici specifice studierii paleoclimatului, ce includ atât analize fizice, cât și chimice (Bradley, 2014).

Etapa de teren s-a desfășurat în două campanii diferite, una în martie 2015 la Peștera Ghețarul de Scărișoara și cealaltă în luna mai, 2016 la Peștera Focul Viu. Deși este de preferat ca extragerea carotelor de gheață să se efectueze în sezonul de iarnă, când temperaturile aerului sunt negative, acest lucru a fost imposibil datorită condițiilor meteorologice aferente iernii 2014-2015 (temperaturile crescute din timpul iernii 2014-2015 nu conduceau la înghețarea lacului de deasupra blocului de gheață de la Scărișoara) și ale cele din 2015-2016 (stratul ridicat de zăpadă a condus practic la inaccesibilitatea către Avenul Focul Viu) care practic au dictat în alegerea perioadei de efectuare a campaniilor de teren.

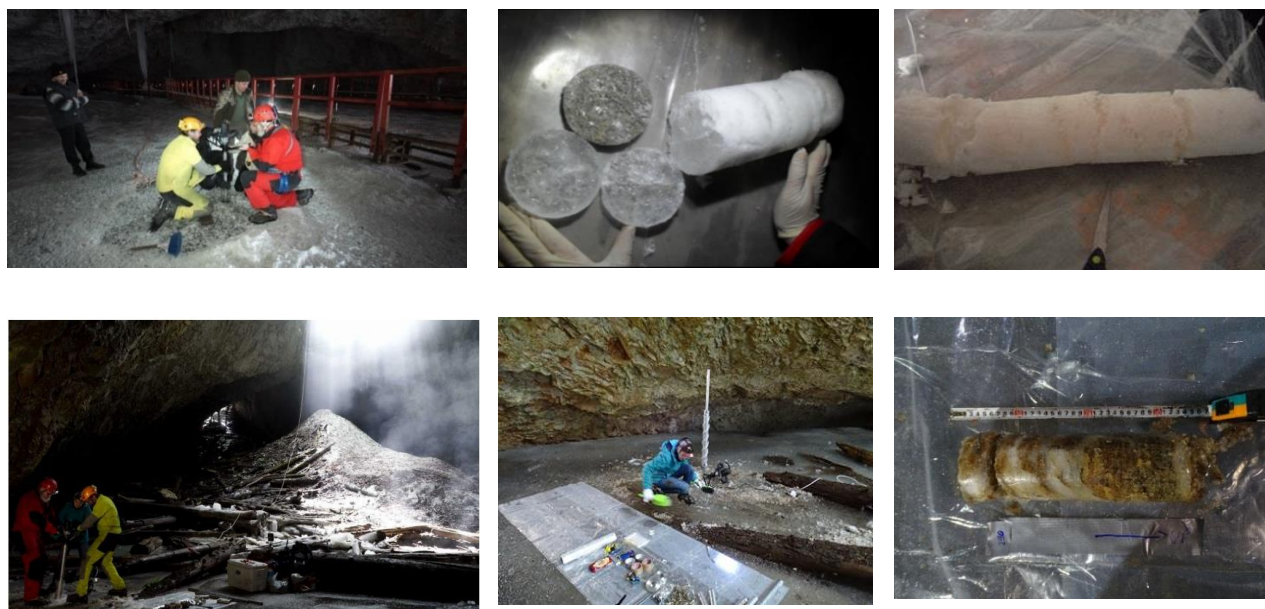


Fig. 3. Extragerea carotelor din Peștera Ghețarul de la Scărișoara (imaginile din partea superioară) Peștera Focul Viu (imaginile din partea inferioară). Sursa fotografiilor: Bădăluță Carmen și Ciubotărescu Christian.

Carota extrasă din Peștera Ghețarul de la Scărișoara are o lungime de 13.1 m, fiind compusă din 73 microcarote cu lungimi cuprinse între 2 – 31 cm (Fig. 3). După scoaterea pe cât se poate de sterilă a microcarotelor din carotier, acestea au fost puse în pungi de nylon pentru a putea fi depozitate și pentru a evita contaminarea probelor.

Extragerea carotei de gheață de la Peștera Focul Viu (Fig. 3) a fost mai dificilă, datorită faptului că peștera nu este legată la surse de electricitate, alimentarea caroterului electric fiind realizată cu ajutorul unui generator alimentat cu carburant. De asemenea, temperaturile crescute din luna mai 2016 au condus la secționarea gheții extrase în lamele de mici dimensiuni (1-3 cm grosime), cu excepția porțiunii cuprinse între 290-320 cm, unde am interceptat un arbore. Carotarea s-a realizat în partea dreaptă a conului de zăpadă, extragându-se 4,87m gheață (Fig.3).

¹ Sintagmă utilizată în engleză *multi-proxy* ce poate fi tradusă în limba română ca și *indicatori multipli*.

În vederea corelării compoziției izotopice din apa de precipitații cu cea din gheață am instalat o stație de colectare a apei de precipitații în cătunul Ghețar, la o distanță de cca 1km față de Peștera Ghețarul de la Scărișoara. *Colectarea precipitațiilor* s-a realizat lunar în intervalul 2012-2017.

Metodele și tehnicile utilizate în laborator sunt indispensabile în orice studiu de paleoclimă și paleomediul, prezentând un grad mare de complexitate. Pentru ambele peșteri cu gheață, reconstituirile de climă și implicit ale mediului s-au realizat cu metode specifice, precum: datări de vârste cu radiocarbon, determinarea compoziției izotopice a gheții și determinarea compoziției izotopice a calcitului criogenic sub formă de pudră, dar și alte metode adiționale (dezghețarea probelor, filtrarea probelor de apă și colectarea calcitului criogenic).

Analizele izotopice din apă (precipitații, respectiv apa provenită din topirea microsecțiunilor de gheață din cele două carote) s-au realizat în Laboratorul de Izotopi Stabili, din cadrul Universității "Ștefan cel Mare" din Suceava cu ajutorul spectrometrului cu laser Picarro L2130i, conectat la un modul de vaporizare de mare precizie.

Toate probele au fost realizate manual, cu ajutorul unei seringi de tip SGC Analytical Science în care se introduce o cantitate de apă de 1,25 μ l (Fig. 4) și apoi injectate în vaporizator pentru analiza de oxigen ($\delta^{18}\text{O}$) și hidrogen (δD), analiză ce durează 6 minute. Fiecare probă este analizată de mai multe ori (dar nu mai puțin de 6 ori fiecare) până când deviația standard a ultimilor 4 injecții, să fie mai mică de 0,03 pentru $\delta^{18}\text{O}$ și 0,3 pentru $\delta^2\text{H}$. Media ultimelor 4 injecții a fost acceptată ca valoare în urma normalizării pe scara SMOW – SLAP, care utilizează două standarde interne (VSMOW2 și SLAP2) deja calibrate și asigurate de către Agenția Internațională pentru Energie Atomică (IAEA). Pe lângă cele două standarde de calibrare, s-a utilizat un al treilea standard intern al laboratorului, care are rolul de a verifica stabilitatea analizatorului pe termen lung.

Precizia este estimată a fi mai bună de 0,16 ‰ pentru $\delta^{18}\text{O}$ și de 0,7 ‰ pentru $\delta^2\text{H}$, aceasta fiind bazată pe măsurătorile repetate ale standardului intern.



Fig. 4. Componenta spectrometrului cu laser Picarro L2130i și injectarea manuală a probelor cu ajutorul seringii de tip SGC Analytical Science (Sursa fotografiilor: Viorica Nagavciuc)

Analizele izotopilor de calcit criogenic au fost determinate cu ajutorul unui spectrometru de masă IRMS, conectat la un autosempler Finnigan GasBench II care ajută la prepararea probelor. Analiza carbonaților cu ajutorul Finnigan GasBench II este utilizată ca și metodă de mare precizie, astfel d^{13}C : $\pm 0,06$ ‰, iar d^{18}O : $\pm 0,08$ ‰. Probele analizate sunt raportate la standardele internaționale NBS 18, NBS 19 determinate de Agenția Internațională de Energie Atomică (IAEA).

În vederea estimării ratei de acumulare a gheții și a *determinării vârstei* blocurilor de gheață subterane am utilizat metoda radiocarbonului. Atât în cazul Peșterii Focul Viu, cât și în cazul Peșterii Ghețarul de la Scărișoara materia organică a fost reprezentată din rămășițe de frunze, bucăți de lemn din trunchiuri de arbori, licheni, ace de conifere. Fragmentele organice au fost depozitate în tuburi centrifuge cu apă distilate și depozitate la o temperatură de 4°C. În urma analizelor, rezultatele

datărilor cu radiocarbon au fost calibrate cu ajutorul programului OxCal 4.2.4 (Bronk Ramsey 2013), utilizând curba de calibrare Atmospheric IntCal13 pentru Emisfera Nordică (Reimer et al. 2013).

Identificarea *morfologiei calcitului criogenic* s-a realizat cu ajutorul unui microscop de tip OLYMPUS CX43, iar captarea imaginilor a fost făcută la plan C N 10x /0.25.

Interpretarea rezultatelor s-a realizat cu ajutorul celor mai complexe **metode statistice și cartografice**, la care s-au adăugat **modele și simulări climatice**.

Din cadrul **metode statistice necesare pentru analiza teleconexiunilor s-au** utilizat metode de determinare cunoscute în climatologie precum creionarea *hărților de corelație*, *hărților compozite* și *analiza Funcției Ortogonale Empirice (EOF)*. Pe lângă acestea au mai fost utilizate *metode de corelație*, printre care enumerăm: *corelația și regresia*, *coeficientul de corelație*, *covarianța*, *matricea de corelație R*.

În vederea *estimării riscului la evenimente extreme* am utilizat softul CalizaTM Versiunea 3.0. Această metodă presupune extragerea intervalului de timp necesar pentru estimare timpului ratei de apariție a riscului și realizarea simulării bootstrap pentru benzii de confidență (Mudelsee, 2014). Mai mult, trendul de apariție al evenimentelor extreme a fost confirmat prin utilizarea testului statistic Cox și Lewis (Cox și Lewis, 1966).

Pentru *reconstituirea traiectoriilor surselor de umiditate* s-a utilizat *modelul HYSPLIT (Hybrid Simple Particle Langrangian Integrated Trajectory)* (Stein et al., 2015) pentru toate evimentele ploioase (1023 de traiectorii) din perioada aprilie 2012 - ianuarie 2018 înregistrate la stația meteorologică Stâna de Vale.

Pentru realizarea *hărților de variație a temperaturii din timpul verii din perioada AD 850 – 2000*, pe baza a unui număr de 19 serii cronologice din diferiți indicatori proxy a fost necesară standardizarea datelor. Această metodă a fost absolut necesară deoarece date cu valori diferite (de exemplu valoarea maximă dintr-o serie este de 0,2, iar dintr-o altă serie 3,7) nu se pot analiza din punct de vedere statistic. În cazul de față această standardizare a implicat calcularea *mediei*, *abaterii* și *abaterii standard*.

Analiza cartografică s-a realizat cu ajutorul programului *ArcGIS 10.2.2* și *Matlab*.

În ceea ce privește **baza de date** utilizată, aceasta include date gridate (temperatura, precipitații, temperatura solului, umezeala relativă), cronologii ale unor indicatori proxy și indicatori de teleconexiune, dar și date extrase din documente istorice.

5. FACTORII DE CONTROL AI PARAMETRILOR CLIMATICI LA SCARĂ SEZONIERĂ ÎN PERIOADA INSTRUMENTALĂ

Pentru a face mai clar demersul lucrării noastre și al evoluției temperaturii pe ultimii 1000 de ani, am analizat datele climatice instrumentale aferente siturilor de studiu, ca factori ce controlează ghețarii subterani. Această analiză presupune o caracterizare detaliată a temperaturii aerului, a temperaturii solului și a precipitațiilor anuale. Variabilitatea temperaturii aerului și a cantităților de precipitații are legătură cu principalele configurații de teleconexiuni din Emisfera nordică asupra cărora ne-am propus să insistăm. În analiza evoluției paleoclimatului, măsurătorile instrumentale au capacitatea de a valida diverși indicatori proxy cu rezoluții diferite (Mann, 2002), un alt aspect ce motivează analiza de față.

Principalele configurații de teleconexiuni din Emisfera Nordică au fost identificate în câmpul anamoliilor înălțimii geopotențialului la 500 mb (Wallace și Gutzler, 1987) și la 700 mb (Barston și Livezey, 1987). Astfel, în Emisfera Nordică s-au identificat următoarele structuri de teleconexiuni, care afectează inclusiv teritoriul României: Oscilația Nord Atlantică (NAO) – cu acțiune în toate lunile anului;

Configurația Atlanticului de Est (EA) care acționează în perioada septembrie – aprilie; Oscilația Arctică (AO), cu acțiune în lunile decembrie, ianuarie și februarie; Configurația Atlanticului de Est și Vestul Rusiei (EAWR) – care este prezentă din septembrie până în mai.; Configurația Scandinavică (SCA) care este prezentă tot timpul anului, cu excepția lunilor iunie și iulie; Configurația Polar-Euroasiatică (POL) care se manifestă în perioada decembrie – februarie; Oscilația Multidecadală Atlantică (AMO) care acționează predominant în timpul verii.

Tab. 2. Principalele configurații de teleconexiuni din Emisfera Nordică și corelațiile sezoniere ale acestora cu temperatura aerului și cantitatea de precipitații din arealul zonei de studiu

Sezon	Indici	POL	NAO	EA/WR	SCA	EA	AMO	AO
Iarna	T aer (°C)	-0.16	0.30	-0.10	0.03	0.51	-0.03	0.09
	PP (mm)	-0.30	-0.43	-0.38	-0.02	-0.13	0.16	-0.59
Primăvara	T aer (°C)	0.12	0.12	0.06	-0.13	0.34	0.00	0.39
	PP (mm)	-0.43	-0.38	-0.20	-0.15	0.13	0.29	-0.46
Vara	T aer (°C)	0.26	-0.29	-0.34	-0.26	0.57	0.51	-0.07
	PP (mm)	0.16	-0.05	0.11	0.18	-0.08	0.03	0.08
Toamna	T aer (°C)	-0.14	-0.13	-0.35	0.38	0.39	0.26	-0.15
	PP (mm)	-0.22	-0.23	-0.22	0.03	-0.26	0.15	-0.40

În ceea ce privește teritoriul României, se constată o corelație pozitivă a indexului NAO pe timpul iernii (perioada DJF²) cu temperatura, dar în același timp o corelație negativă cu cantitatea de precipitații (Tabel 2). Totuși, acesta nu explică variabilitatea temperaturilor pe timpul iernii în zona Apusenilor, indexul NAO acționând majoritar în cazul extremelor. Acest fapt a fost reflectat în $\delta^{18}\text{O}$ din carota de gheață extrasă din Peștera Ghețarul de la Scărișoara, izotopii de oxigen fiind utilizați drept indicatori de reconstituire a temperaturii aerului din timpul iernii

În schimb, influența AMO este resimțită în special în sezonul de vară, acesta fiind principalul factor determinant al variabilității temperaturii aerului din Peștera Focul Viu și joacă un rol important în menținerea și acumularea gheții

² prescurtare pentru lunile Decembrie-Ianuarie-Februarie

6. RECONSTITUIREA TEMPERATURII AERULUI DIN ULTIMII 1000 DE ANI PE BAZA ANALIZEI IZOTOPILOR STABILI DIN DEPOZITELE DE GHEAȚĂ DIN PEȘTERI

Variabilitatea climatică din ultimul mileniu reprezintă o problemă intens discutată, deoarece trăim într-un context al schimbărilor climatice, puse pe baza impactului antropic (IPCC, 2014).

Studierea arhivelor de gheață subterane este relativ recentă, dar rezultatele cantitative sunt apreciabile și de mare actualitate, deoarece acestea conțin informații cu privire asupra climatului (temperatura, precipitațiile, sursa precipitațiilor), dar și al mediului (activitatea vulcanică, dinamica vegetației sau modificări ale acesteia, activități antropogene etc).

Datorită complexității celor două situri, Peșterile Ghețarul de la Scărișoara și Focul Viu (atât din punct de vedere al formării acestora, cât și din punct de vedere al acumulării depozitelor de gheață) au fost alese pentru a răspunde obiectivului propus, respectiv, reconstituirile paleoclimatice.

În cadrul acestei lucrări ne vom concentra asupra interpretării climatice din ultimul mileniu, atât la nivel local (Munții Bihor), cât și la nivel regional (vestul României și Europa Central-Estică). Mai exact, siturile de studiu vor fi comparate între ele pentru definirea climatului local, ulterior fiind comparate cu alte situri din emisfera nordică, cu precădere din Europa pentru a observa diferențele la nivel regional.

Climatul din ultimii o mie de ani a prezentat o serie de oscilații, fiind definite astfel ca perioade climatice subordonate Holocenului. Aceste perioade sunt Perioada Medievală Caldă (MWP³) sau Anomalia Climatică Medievală (MCA⁴) cuprinsă între anii 950-1200 AD, Mica Eră Glaciară (LIA⁵) între 1450-1850 AD sau Mica Glaciațiune (Jones et al., 2001; Mann et al., 2003) și perioada industrială (cuprinsă între 1850- prezent).

Cuantificarea variațiilor climatice pe baza carotelor de gheață reprezintă o nouă direcție în reconstituirile paleoclimatice. iar protocolul de studiu a fost în detaliu urmărit în această lucrare. Drept consecință, în secțiunile următoare ne-am propus să răspundem obiectivului central ale tezei, și anume, reconstituirea temperaturii aerului pentru ultimul mileniu, analizând cronologia/vârsta carotei de gheață, rata de acumulare a depozitelor de gheață, identificarea mecanismelor care au stat la baza acestui proces, creionarea profilelor izotopice din gheață– indicatori proxy pentru temperatura aerului.

În vederea stabilirii semnalului climatic din cele două peșteri am analizat compoziția izotopică a apei din precipitații, care ulterior a fost comparată cu compoziția izotopică a apei din gheața peșterilor. Compilarea datelor de $\delta^{18}\text{O}$ și $\delta^2\text{H}$ din precipitațiile lunare analizate în intervalul aprilie 2012 – ianuarie 2018 la stația de monitorizare Ghețar ne-a oferit informații necesare identificării sezonului la care răspund cei doi ghețari subterani, respectiv Ghețarul de la Scărișoara și Focul Viu.

Variabilitatea $\delta^{18}\text{O}$ și $\delta^2\text{H}$ în precipitațiile din apropierea peșterilor este asemănătoare temperaturii aerului (Fig.5) cu un maxim al valorilor în luna iulie sau august (-3.6 ‰ pentru $\delta^{18}\text{O}$ și -26 ‰ pentru $\delta^2\text{H}$) și un minim (-19.8 ‰ pentru $\delta^{18}\text{O}$ și -140 ‰ pentru $\delta^2\text{H}$) în luna ianuarie. Media compoziției izotopice din precipitații din timpul verii prezintă valori aproape similare cu media compoziției izotopice din gheața din Peștera Focul Viu, pe când media valorilor înregistrate în timpul iernii este similară cu cea din gheața de la Ghețarul de la Scărișoara (Fig.5). Mai mult, izotopii stabili de $\delta^{18}\text{O}$ au fost comparați cu alți indicatori proxy care înregistrează același semnal.

³ MWP – din engl. Medieval Warm Period

⁴ MCA – din engl. Medieval Climate Anomaly

⁵ LIA – din engl. Little Ice Age

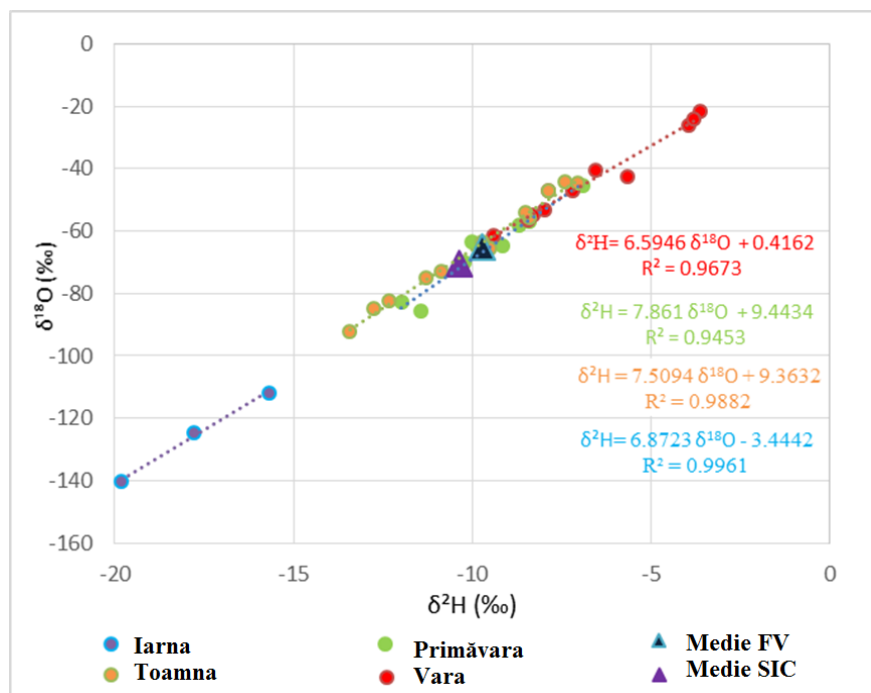


Fig. 5. Distribuția sezonieră a $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ în precipitații la Ghețar și media $\delta^{18}\text{O}$ și $\delta^2\text{H}$ în gheața din FV și SIC

Potrivit rezultatelor obținute putem afirma și susține că gheața din Peștera Ghețarul de la Scărișoara poate fi utilizată pentru reconstituirea temperaturii înregistrate în timpul iernii, pe când gheața de la Peștera Focul Viu înregistrează temperatura din timpul verii.

În ceea ce privește determinarea surselor de precipitații / umiditate, acestea au fost evidențiate printr-o analiză comparativă realizată între parametrul d-excess și traiectoriile de deplasare a maselor de aer (obținute cu ajutorul modelului HYSPLIT), la care s-a adăugat circulația atmosferică la scară largă. Astfel, valorile mai mici de 12‰ ale parametrului d-excess sunt determinate de masele de aer Atlantice, iar cele cuprinse între 13 - 18‰ de care vin surse de umiditate care vin dinspre Marea Mediteraneană, acestea fiind puse pe baza condițiilor de evaporare mari din Estul Mării Mediterane.

Reconstituirea temperaturii aerului din Peștera Ghețarul de la Scărișoara a scos în evidență individualizarea a trei faze climatice bine delimitate în timp, respectiv: Perioada Medievală Caldă, (MWP, AD 850-1250), Perioada de Tranziție (AD 1250 - 1450) și Mica Eră Glaciară (AD 1450-1860). Perioada Medievală Caldă evidențiază faza climatică mai caldă, cuprinsă între AD 850 – 1250 și este caracterizată prin valori medii ridicate ale $\delta^{18}\text{O}$ (-10.1‰) și ale d-excesului (12‰). Creșterea valorilor $\delta^{18}\text{O}$ indică o creștere a temperaturii în MWP (Fig. 6), iar valorile d-excesului sugerează surse de umiditate calde/uscate la începutul MWP (perioada AD 890 – 1000) și surse umede și reci în perioada AD 1000 – 1250 (Fig. 6). Aceste condiții fac ca rata de acumulare a ghețarului să fie redusă. În schimb, Perioada de Tranziție (AD 1260 – 1450) prezintă oscilații majore din punct de vedere termic (și a surselor de umiditate, cu scăderi / creșteri ale $\delta^{18}\text{O}$ și d-excesului care în general indică alternarea perioadelor calde cu cele reci, pe fondul unor surse de umiditate calde și uscate, cu excepția intervalului AD 1268-1277 când originea surselor este predominant rece și umedă. A treia perioadă este reprezentată de Mica Eră Glaciară (LIA, AD 1450 – 1860) și este caracterizată de valori mici ale $\delta^{18}\text{O}$ și valori preponderent mari ale d-excesului, care indică un climat rece și uscat. Dacă în prima parte a LIA iernile erau în general reci și umede, în cealaltă jumătate LIA este interpretată ca fiind rece și uscată.

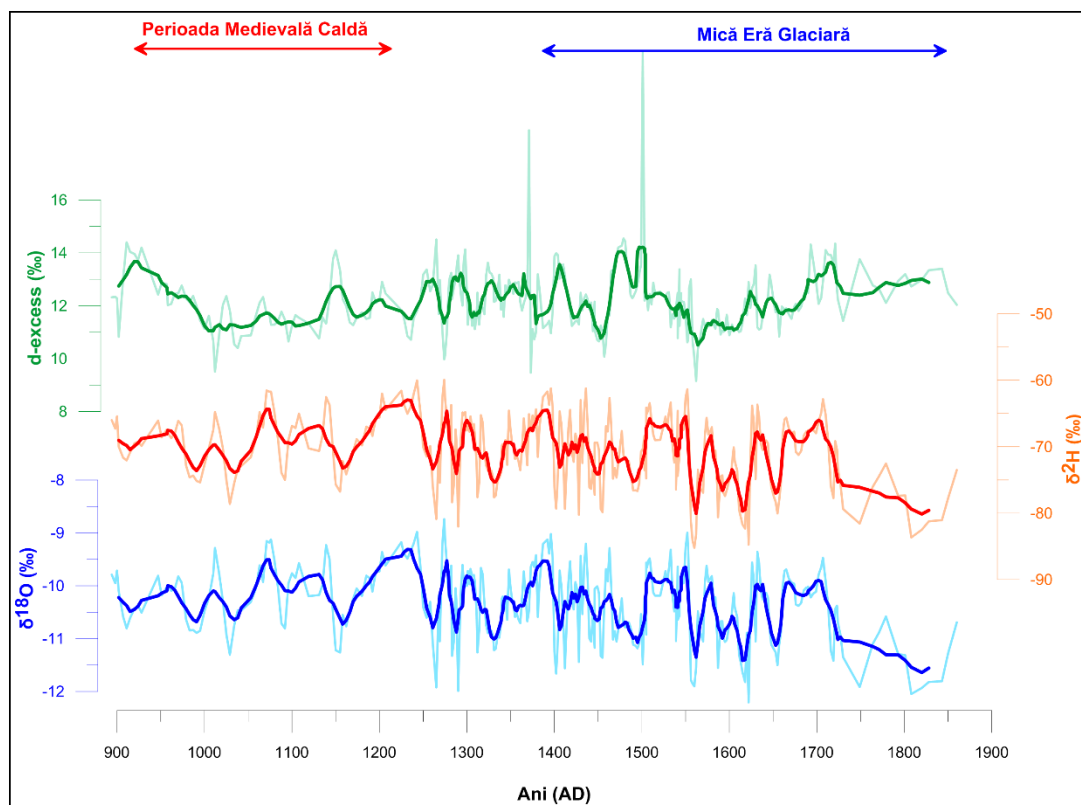


Fig. 6. Variațiile izotopilor stabili de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ și a d-excess-ului (exprimate în ‰) din gheața analizată de la Peștera Ghețarul de la Scărișoara în perioada AD 894 – 1860. Liniile mai groase reprezintă mediile glisante cu interval de 7 ani.

Rata de acumulare a gheții prezintă anumite variații (evenimente de topire) generate de alternanța indexului NAO și a originii surselor de precipitații. Evenimentele de topire din AD 1485 - 1552 au fost în mare parte determinate de sursele de precipitații dinspre Marea Mediterană, corelate cu un trend pozitiv al indexului NAO (NAO+), iar cele din AD 1697-1860 pe un trend negativ al indexului NAO (NAO-). Între aceste două evenimente majore de topire identificate se observă și o creștere bruscă a ratei de acumulare în intervalul AD 1560-1690, care este corelată cu surse de umiditate reci și umede de tip Atlantic și cu o fază negativă a indexului NAO (NAO-).

Corelațiile cu rezultatele de reconstituire a climatului la nivel regional (Europa, Asia de Sud-Vest, și Nordul Africii) inclusiv a temperaturii aerului, din timpul iernii a reprezentat o altă manieră de a ne valida propriile rezultate (Fig.7). Astfel, analiza comparativă cu alte reconstituiri indică o perioadă caldă și uscată în prima parte a MWP (până în AD 900), urmată de o fază caldă și umedă în cea de-a doua parte (AD 900-1250) la nivel local (arealul Peșterii Ghețarul de la Scărișoara), aceeași trend cald și umed fiind observat și la nivelul Europei Centrale și Sud-Vestice (Fig.7a) Totodată analiză indică un climat umed în vestul Asiei și cald și uscat în Nordul Munților Atlas (Africa). În schimb, în timpul LIA comparația evidențiază predominarea un climat rece și uscat în toată Europa, dar și în regiunile mai îndepărtate precum Nordul Africii, Orientul Mijlociu și Vestul Asiei (Fig.7b)

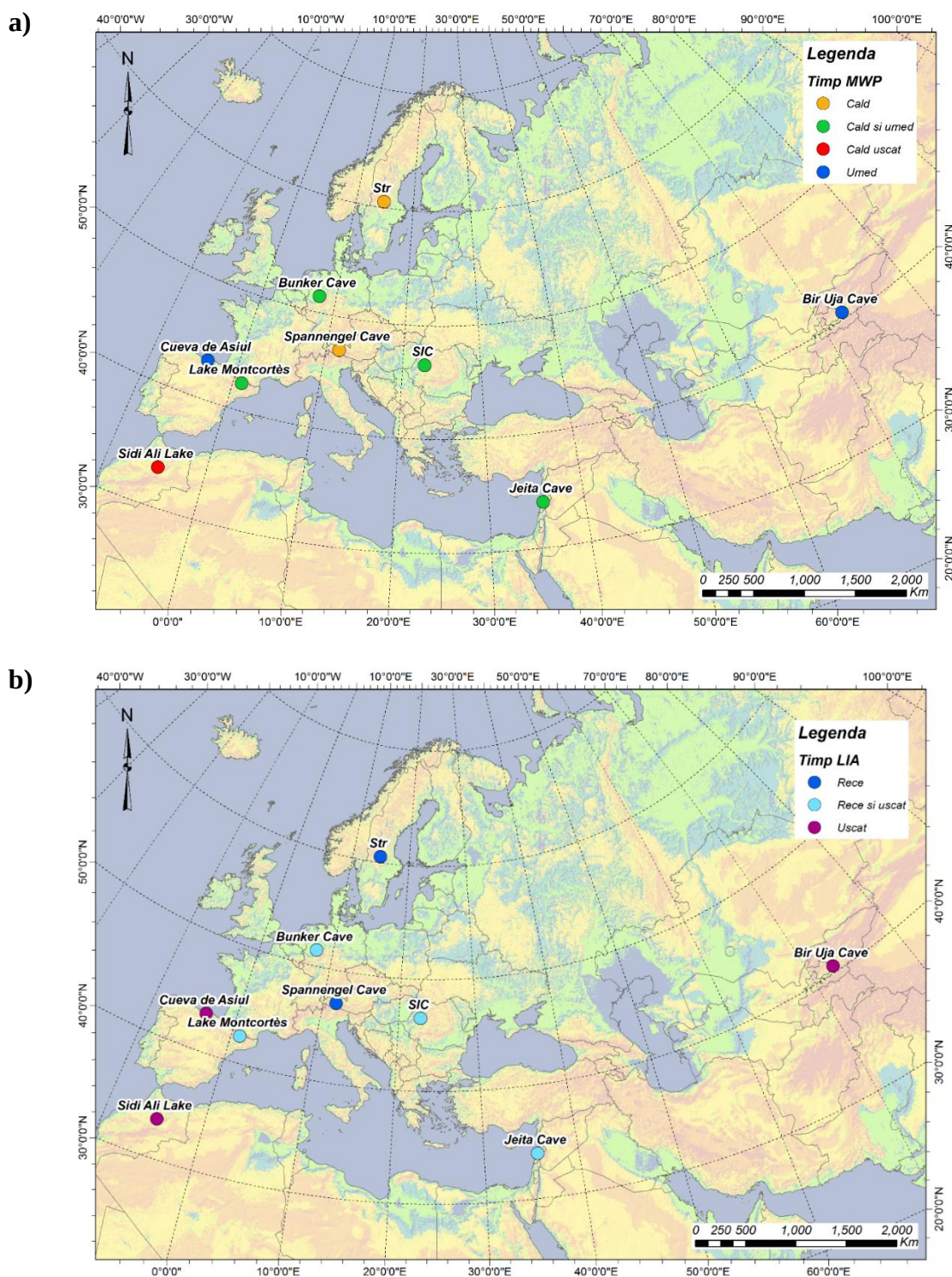


Fig. 7. Condițiile climatice specifice sezonului rece din timpul a) Perioadei Medievale Calde (MWP) și b) Miciei Ere Glaciare (LIA) înregistrate pe baza indicatorilor proxy descriși în Anexa 1.

Observațiile cu privire la dinamica gheții din Peștera Focul Viu din ultimii 18 ani au arătat că depozitarea acesteia începe toamna timpuriu, datorită înghețului apei acumulate în timpul verii. Având în vedere că peștera este deschisă la partea superioară (prin prăbușirea tavanului) precipitațiile intră direct în peșteră și formează gheața a cărei compoziție izotopică nu e modificată de epicarstul din arealul peșterii (Moldovan et al., 2015; Ersek et al., 2018), astfel că gheața din Peștera Focul Viu poate fi considerat un potențial indicator proxy pentru temperatura aerului din timpul verii. La scară

multidecadală s-a observat că temperatura aerului din timpul verii de la nivelul României este controlată în special de Oscilația Multidecadală Atlantică (Fig.8) (Ioniță et al., 2012).

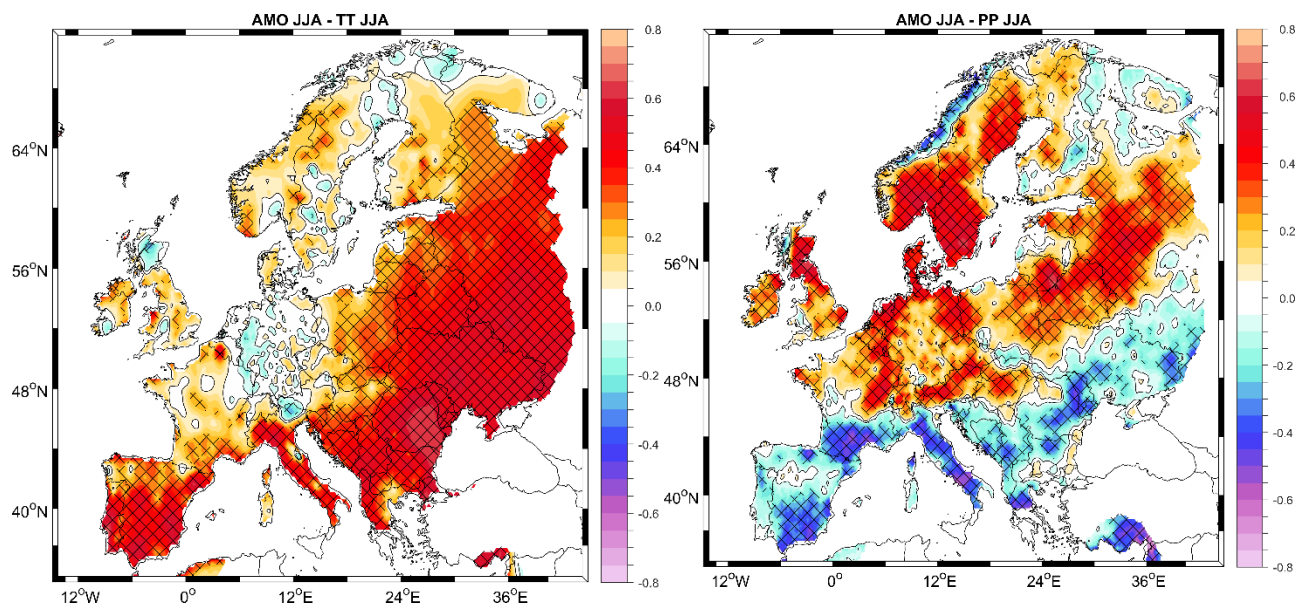


Fig. 8. a) Harta corelației Oscilației Multidecadale Atlantice (AMO) în timpul verii (pentru lunile Iunie, Iulie și August) cu temperatura aerului și b) cantitatea de precipitații în timpul fazei pozitive.

Reconstituirea temperaturii aerului din Peștera Focul Viu evidențiază variații mici ale $\delta^{18}\text{O}$, fapt ce indică o stabilitate termică pe timpul verii în decursul ultimului mileniu. Analiza temporală a variabilității $\delta^{18}\text{O}$ evidențiază că valorile cele mai mici se produc în timpul minimelor solare. Totodată, izotopii de oxigen ($\delta^{18}\text{O}$) din gheața de la Focul Viu surprind variabilitatea multidecadală a Oscilației Multidecadale Atlantice (AMO), cu posibile implicații pentru reconstituirea dinamicii circulației atmosferice la scară largă din ultimii 1000 de ani la nivelul Europei. Potențial mecanism a variabilității multidecadale a $\delta^{18}\text{O}$ înregistrat în gheața de la Focul Viu poate fi explicat prin: perioadele prelungite cu anomalii pozitive de temperatură în lunile de vară, ca urmare SST cald pe o perioadă mai lungă în Nordul Oceanului Atlantic, determinând valori mari ale $\delta^{18}\text{O}$ și topirea gheții în situl analizat, pe când anomaliile negative de temperatură sunt datorate răcirii SST-ului din Atlanticul de Nord, care fac ca valorile de $\delta^{18}\text{O}$ din gheață să fie mai mici. Pe o scară decadală, atât în timpul Perioadei Medievale Calde cât și în timpul, vara temperaturile au fluctuat cu o periodicitate de $\sim 20/30$ de ani, minimele și maximele fiind determinate de fluctuațiile înregistrate de temperaturile de la suprafața Oceanul Atlantic.

Mai mult, analiza comparativă dintre mai multe situri care înregistrează temperatura aerului din timpul verii a condus la identificarea unui contrast climatic între vestul și estul Europei în timpul Perioadei Medievale Calde, tradus printr-un climat cald și uscat în partea vestică și nord-vestică a Europei și a unui climat cald și umed în partea estică a continentului, acesta fiind pus pe baza circulației atmosferice din acea perioadă.

Cu alte cuvinte cele două blocuri de gheață înregistrează atât temperaturile din timpul iernii și al verii, cât și schimbările de circulație la scară mare, respectiv Oscilația Nord Atlantică (în Ghețarul de la Scărișoara) și Oscilația Multidecadală Atlantică (în cazul Peșterii Focul Viu).

Analiza temperaturii aerului pe parcursul ultimilor 1000 de ani (atât pe timpul iernii cât și pe timpul verii) reflectă în mod evident că principalele modificări survenite au fost datorate îndeosebi variațiilor de temperatură din timpul iernii și mai puțin celor din timpul verii.

O nouă abordare în domeniul paleoclimatologiei este determinarea variațiilor de temperatură pe baza calcitului criogenic (CCC), precum un nou indicator proxy. În vederea determinării profilelor

izotopice a calcitului au fost analizate un număr de 115 probe în cazul forajului de gheață extras din Peștera Ghețarul de la Scărișoara și 63 de probe din carota de la Focul Viu.

Rezultatele obținute pe baza analizelor de izotopi stabili indică variații ale $\delta^{18}\text{O}$ (‰) și $\delta^{13}\text{C}$ (‰) în cele două peșteri (Fig. 9), fapt ce ar putea indica influențe climatice diferite. Astfel, în Peștera Focul Viu, valorile medii sunt de -5.2 ‰ pentru $\delta^{18}\text{O}$ și 1.1 ‰ pentru $\delta^{13}\text{C}$. Valorile minime sunt de -9.4 (‰) pentru $\delta^{18}\text{O}$ și -9.8 ‰ pentru $\delta^{13}\text{C}$, iar cele maxime de -2.6 ‰ pentru $\delta^{18}\text{O}$ și 9.0 ‰ pentru $\delta^{13}\text{C}$. În schimb, în Peștera Ghețarul de la Scărișoara analizele indică valori medii de -4.6 ‰ pentru $\delta^{18}\text{O}$ și 3 ‰ pentru $\delta^{13}\text{C}$, valori minime de -8,3 ‰ pentru $\delta^{18}\text{O}$ și -5.3 ‰ pentru $\delta^{13}\text{C}$ și valori maxime de -1.7 ‰ pentru $\delta^{18}\text{O}$ și 9.5 ‰ pentru $\delta^{13}\text{C}$.

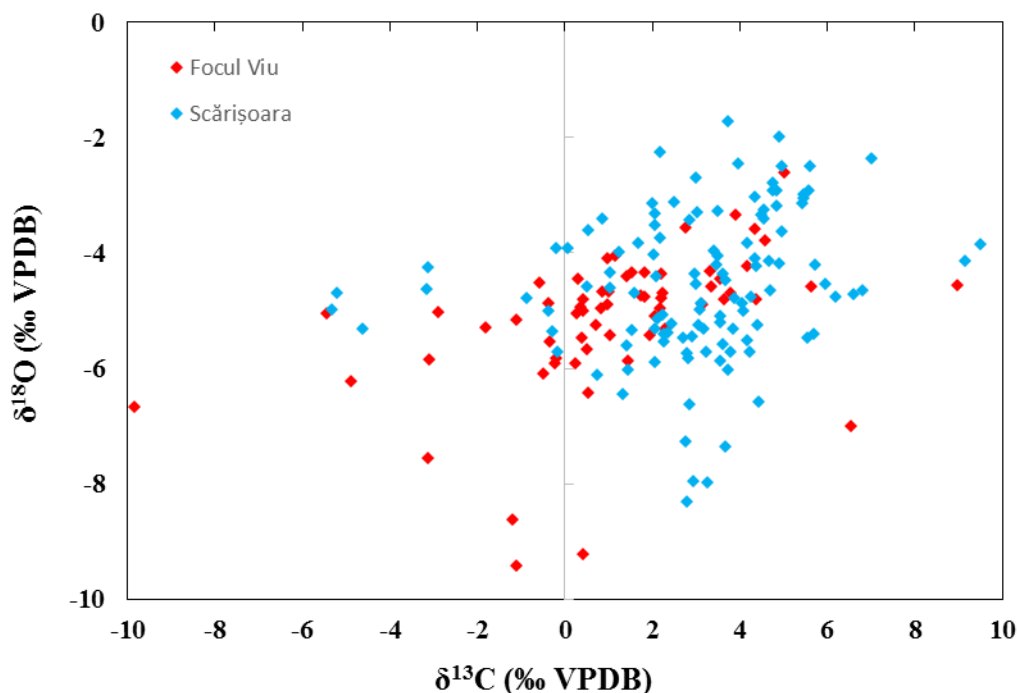


Fig.9 $\delta^{18}\text{O}$ (‰ VPDB) și $\delta^{13}\text{C}$ (‰ VPDB) din calcitul criogenic sub formă de pudră din Peștera Ghețarul de la Scărișoara (puncte albastre) și Peștera Focul Viu (puncte roșii).

În ambele peșteri, profilele izotopice prezintă valori mai mari până în AD 1200, dar mai mici și cu o variabilitate mare între AD 1200 – 1800 ce corespund Perioadei Medievale Caldă (MWP), respectiv Miciei Ere Glaciare (LIA). Variabilitatea compoziției izotopice a calcitului criogenic poate indica o anumită influență climatică.

Valorile $\delta^{13}\text{C}$ formează două grupuri distincte, cu valori mai mari (cu o medie de +3.5 ‰ pentru SIC și +2.42‰ pentru FV) în MWP și valori mai mici (cu o medie de +3.1 ‰ pentru SIC și +0.82‰) pentru probe formate în timpul LIA. Astfel, valorile mai mari ale $\delta^{13}\text{C}$ din sol pot fi cauzate fie de o limitare a umidității la plante sau umidității scăzute sau fie de condițiile ridicate de evaporare. Totuși, studiile anterioare care analizează perioada MWP evidențiază că în zona de studiu era mai cald, dar există și studii contradictorii în ceea ce privesc precipitațiile, care reflectă atât condiții umede cât și uscate, fapt care îngreunează interpretarea izotopilor de carbon. Pe lângă influența climatică directă, un rol important îl joacă adâncimea solului, deoarece solurile cu adâncimi mai mari, după cum era de așteptat în pădurile de mesteacăn care dominau în timpul Perioadei Medievale Calde ar fi avut mai multă îmbogățire în izotopi grei cu adâncimea decât solurile din perioada LIA, alcătuită în general din păduri de molid (Bădăluță et al., 2017). De asemenea temperaturile ridicate și/sau

secetele ar putea influența, de asemenea, cinetica reacției, care poate fi suficient de mare pentru a suprapune orice semnal de sol în $\delta^{13}\text{C}$.

În ultimii 150 de ani se observă un trend de creștere a valorile $\delta^{13}\text{C}$ (cu o medie de +3.33‰) și $\delta^{18}\text{O}$ în CCC de la FV (excepție făcând proba din AD 1916), acestea putând fi explicate de creșterea temperaturii medii atât la nivel global (Mann et al., 2009) cât și la nivel regional, când s-au identificat condiții climatice mai calde corespunzătoare arealelor din Munților Apuseni (Forray et al., 2015).

7. RELAȚIA CLIMAT – SOCIETATE ÎN ULTIMII 500 DE ANI

Ultima parte a tezei de doctorat surprinde în linii mari relația dintre climat – societate din ultimii 500 de ani, pe baza datelor istorice și a celor surprinse de indicatorii proxy (Fig. 11). Prin investigațiile noastre asupra reconstituirilor climatice ale ultimului mileniu au existat premise favorabile de cunoaștere a evenimentelor climatice extreme înregistrate cu precădere în ultimii 500 ani pentru zona teritoriului României. Aceste extreme climatice au putut fi evaluate sub aspectul impactului asupra societății umane. Studii similare au fost realizate în multe alte regiuni ale Europei, mai puțin în aria ocupată de Carpații Românești. Iată de ce considerăm că lucrarea noastră se poate încheia cu un capitol ce utilizează reconstituirile climatice proprii, coroborate cu alte arhive de date proxy din aria teritoriului României, ca un test aplicativ privind amploarea efectelor în plan uman și economic a fenomenelor climatice extreme.

Combinarea datelor istorice (compilate în studiul de față) cu cele din reconstituiri a condus la următoarea sintetiză a variabilității extremelor hidrometeorologice astfel:

1) între 1500 – 1550 mai umed în ECM (regiunea extracarpatică), comparativ cu ICM (regiunea intracarpatică) și cu decade mai puțin reci (Popa și Kern, 2009). Aceasta poate fi parțial explicată pe baza creșterii surselor de umiditate predominant Atlantice (Perșoiu et al., 2017) care determină o creștere a cantității de precipitații și variații locale în acumularea de sedimente a râurilor (Rădoane et al., 2018).

2) în timpul perioadei 1550 - 1750 condițiile hidroclimatice sunt în opoziție, în comparație cu perioada 1500 – 1550, fiind evidențiată o creștere a perioadelor secetoase în ECM comparativ cu ICM. Creșterea evenimentelor ploioase în ICM pentru această perioadă este sincronă cu activitatea fluvială (Wirth et al., 2013) și cu avansarea ghețarilor (Holzhauser et al., 2005) din Alpi, cu fluctuații cvasi-periodice determinate de condițiile umede / uscate și reci / calde. În același timp variabilitatea evenimentelor hidroclimatice dintre ECM și ICM este determinată de circulația atmosferică la scară largă, care face ca originea surselor de umiditate să fie diferite, predominând în special sursele mediteraneene pentru ambele regiuni, fiind sesizată o creștere a furtunilor de vară (Perșoiu și Perșoiu, 2018) și a perioadelor cu precipitații abundente în regiunea ICM.

3) Condiții instabile ale evenimentelor extreme de-a lungul secolului XIX, cu alternarea perioadelor umede și secetoase în ambele regiuni analizate. Astfel, între 1840 – 1900 se observă o creștere a perioadelor umede și secetoase în timpul verii și a primăverii. Condiții calde și uscate sunt de asemenea observate în intensitatea maximă de eroziunii în bazinele lacurilor și nivelul lacurilor din Nord-Estul Carpaților (Florescu et al., 2017) și în scăderea zilelor de îngheț a râurilor (Ioniță et al., 2018).

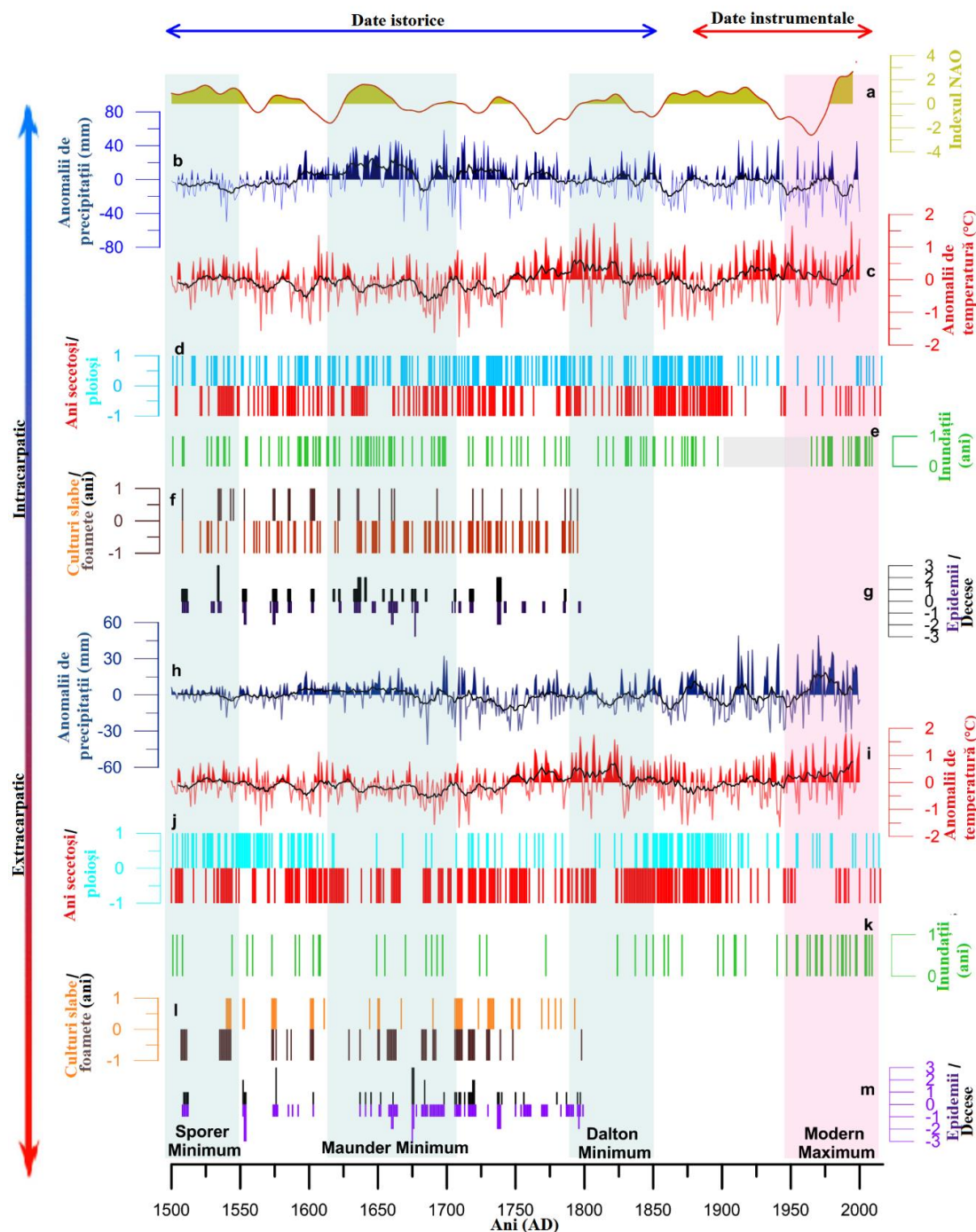


Fig. 10 Variația a) indexului NAO de iarnă (Trouet, 2009), b) anomaliilor de precipitații în ICM (Pauling et al. 2005), c) anomaliilor de temperatură în ICM (Luterbacher, 2004); e) inundațiile din ICM; f) recoltei slabe și foametei în ICM; g) epidemii și decese în ICM; h) anomalie de precipitații în ECM (Pauling et al., 2005), i) anomaliile de temperatură în ECM (Luterbacher, 2004); j) seceta și anii ploioși în ECM; k) ani cu inundații din ECM; l) recolta slabă și foametea în ECM; m) epidemii și decese în ECM.

4) În timpul secolului XX este observată o scădere abruptă a ratei de apariție a evenimentelor ploioase și secetoase în ambele regiuni, fiind totodată identificate condiții umede între 1900 – 1940 și condiții uscate în a doua jumătate a acestui secol, datorită creșterii temperaturii cu cca 1°C, aceasta fiind mai evidentă în timpul verii (Anders et al., 2014). Această schimbare bruscă între perioadele umede și perioadele secetoase poate fi asociată cu modificările survenite în circulația atmosferică la scară largă din timpul ultimului secol (Dima et al., 2010). Astfel, perioada umedă și

rece de la începutul secolului XX coincide cu faza negativă a Oscilației Multidecadale Atlantice (AMO), în timp ce perioada caldă și uscată de după 1970 coincide cu faza pozitivă a Oscilației Multidecadale Atlantice (AMO) (Ioniță et al., 2016). În general, condițiile de secetă la nivelul Europei, pe o scară multidecadală, au fost determinate în funcție de faza AMO (Ioniță et al., 2011).

În vederea obținerii unei reconstituiri a vulnerabilității sociale au fost determinate ratele de apariție ale epidemiilor, foametei și deceselor. În ECM, apariția epidemiilor și a deceselor este marcată de un regim cu valori mari, extins între sfârșitul sec. XVI și până în sec. XIX. Suprapunerea temporală între acest regim și LIA indică următorul fapt: condițiile climatice naturale de bază și evenimentele extreme corespunzătoare au determinat rata de apariție a epidemiilor și deceselor în această zonă. Pentru aceeași regiune, rata de apariție a foametei arată o tendință descrescătoare, care este probabil legată și de dezvoltarea societății și de progresul economic. Dacă această tendință este îndepărtată, curba reziduală are o formă foarte asemănătoare cu aceea a epidemiilor și a deceselor, pentru perioada 1500 – 1800. Aceasta sugerează că rata de apariție a foametei este controlată atât de factorii naturali, cât și de cei sociali.

Pentru regiunea ICM, incidența epidemiilor se suprapune unui regim de valori ridicate, care se extinde între secolele XVI – XIX. Pentru perioada 1500 – 1800, foametea și decesele prezintă o evoluție similară cu epidemiile.

Studiul nostru arată că economia și sănătatea societăților preindustriale au fost adesea determinate de extremele climatice, cum ar fi secetele, inundațiile, valuri de căldură, cu toate că se observă faptul că societatea actuală a învățat să se adapteze mai bine la schimbările de mediu, în special la evenimentele extreme.

Nu în cele din urmă, rezultatele obținute pot fi înglobate în modele și scenarii climatice în vederea prognozzării evenimentelor extreme pentru următorii 100 de ani care vor avea un impact major atât asupra mediului înconjurător cât și din punct de vedere socio-economic. Astfel, proiecțiile scenariilor RCP 26 și RPC 85 arată că numărul iernilor va scădea în perioada 2051 – 2100, iar numărul zilelor uscate și calde consecutive vor crește. Având în vedere aceste modificări ale acestor indicatori este clar că sistemul climatic va fi supus unei aridizări accentuate, care se va amplifica treptat și va avea un impact negativ asupra ratei de acumulare în cei doi ghețari subterani analizați.

Rezultatele acestei teze de doctorat constituie o importanță din punct de vedere științific, deoarece abordează o problemă sensibilă asupra climatului și asupra efectelor acestuia asupra societății și mediului înconjurător. Totodată, lucrarea surprinde modalitatea de răspuns a arhivelor de gheață subterane la perturbările imprimate de circulația atmosferică.

Pe lângă aceste aspecte principale, studiul aduce noi informații cu privire la metodele moderne de cercetare și interpretare, fiind o premieră în cercetarea paleoclimatică din România într-o teză de doctorat.

CONTRIBUȚII PERSONALE

Activitatea de cercetare din timpul studiilor doctorale are ca scop principal reconstituirea temperaturii aerului din ultimii 1000 de ani, având la bază rezultate obținute pe baza celor mai noi metode de cercetare aplicate la nivel național. În continuare menționăm cele mai importante contribuții originale din cadrul tezei de doctorat:

- prezenta teză de doctorat constituie prima lucrare la nivel național privind reconstituirea temperaturii aerului din ultimii 1000 de ani pe baza depozitelor de gheață subterane.
- introducerea celor mai noi metode de cercetare, respectiv izotopii stabili din precipitații și gheață ($\delta^{18}\text{O}$ și $\delta^2\text{H}$) și calcit criogenic ($\delta^{18}\text{O}$ și $\delta^{13}\text{C}$);
- descifrarea transferului semnalului climatic din precipitații în gheață folosind metoda izotopilor stabili;
- utilizarea mai multor metode statistice elementare noi (exemplu: hărți compozite, hărți de corelație, funcția empirică ortogonală – EOF, rata de apariție a evenimentelor extreme) într-un studiu de paleoclimatologie.
- indentificarea principalilor factori care acționează asupra proceselor de acumulare / topire a ghețarilor subterani și stabilirea relației dintre aceștia cu circulația atmosferică la scară largă.
- trasarea surselor de umiditate pe baza modelului HYSPLIT, în vederea interpretării cât mai corecte a indicatorului d-excess.
- comparația valorilor parametrului d-excess cu sursa de umiditate și hărțile de corelație dintre temperature și geopotential la 500 mb în vederea evaluării ratei de acumulare din cei doi ghețari subterani supuși analizei.
- identificarea răspunsului ghețarilor subterani la principalele schimbări climatice din trecut pe baza izotopilor stabili, surselor de umiditate și a circulației atmosferice la scară largă, dar și a celor prognozate pe viitor pe baza scenariilor climatice.
- demonstrarea faptului că $\delta^{18}\text{O}$ și $\delta^{13}\text{C}$ din gheață și calcit sunt buni indicatori proxy pentru reconstituirile de temperatură, care pot fi utilizați atât la nivel local (Munții Apuseni, România) cât și regional (Europa Central – Estică).
- realizarea, de asemenea, pentru prima dată în România și în Europa unei reconstituiri de temperatură pe timpul verii pe baza unui ghețar subteran utilizând $\delta^{18}\text{O}$ și că variabilitatea multidecadală a $\delta^{18}\text{O}$ este influențată de Oscilația Multidecadală Atlantică, fapt ce ne permite să putem realiza o reconstituirea a circulației atmosferice la scară mare în Europa Central – Estică.
- sintetizarea evoluției climatului și implicit a temperaturii aerului în timpul verii și a iernii din timpul LIA, MWP și perioada modernă la nivel european, cu ajutorul a peste 30 de cronologii și plasarea siturilor de studiu în context regional.
- cuantificarea relației climat – societate din ultimii 500 de ani, atât la nivel intracarpatic cât și extracarpatic pe baza arhivelor documentare, la care se adaugă și cele naturale (inelele de creștere ale arborilor, depozite de gheață subterane, depozite sedimentare, etc), aceasta fiind o premieră în cercetarea paleoclimatică la nivelul României și în cadrul unei teze de doctorat.

Rezultatele prezentei teze de doctorat sunt expuse în cadrul articolelor publicate (conform bibliografiei) și dar și la mai multe manifestări științifice naționale și internaționale.

BIBLIOGRAFIE

- Anders, I., Stagl, J., Auer, I. & Pavlik, D. (2014) Climate Change in Central and Eastern Europe. In Rannow S., Neubert M. (eds.) *Managing Protected Areas in Central and Eastern Europe Under Climate Change*. Advances in Global Change Research. 58, Springer, Dordrecht.
- Andrews, J. T., Jennings, A. E. (2014) Multidecadal to millennial marine climate oscillations across the Denmark Strait ($\sim 66^\circ$ N) over the last 2000 cal yr BP, *Clim. Past*, 10, 325–343, doi:10.5194/cp-10-325-2014.
- Barnston AG, Livezey RE. 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Weather Rev.* 115: 1083–1126.
- Bădăluță C.-A.** (2014) Distribuția izotopilor stabili de $\delta^{18}\text{O}$ și $\delta^2\text{H}$ în acviferele carstice (Munții Apuseni, România) din Platoul Ocoale și relația acestora cu climatul, Teza de masterat, Universitatea Ștefan cel Mare Suceava.
- Bădăluță C.-A.**, Ersek V., Piotrowska N. Perșoiu A., (2017) O and C stable isotopes in cryogenic cave calcite (CCC) – possible proxy or past climate changes, in European Geosciences Union General Assembly 2017, Vienna, Austria
- Bronk Ramsey, C., & Lee, S. (2013). Recent and Planned Developments of the Program OxCal. *Radiocarbon*, 55(2-3), 720-730
- Bradley, R. S., (2014) *Paleoclimatology. Reconstructing Climates of the Quaternary*, Third Edition, Elsevier Press, Amsterdam.
- Busuioc A, Caian M, Cheval S, Bojariu R, Boroneanț C, Baciuc M, Dumitrescu A (2010) Variabilitatea și schimbarea climei în România. Editura Pro Universitaria, București, 226 pp.
- Charman DJ, Barber KE, Blaauw M et al. (2009). Climate drivers for peatland palaeoclimate records. *Quaternary Science Reviews* 28: 1811-1819.
- Citterio, M., Turri, S., Bini, A., Maggi, V., Pelfini, M., Pini, R., Ravazzi, C., Santilli, M., Stenni, B., Udisti, R., (2004) Multidisciplinary approach to the study of the Lo Lc 1650 “Abisso sul Margine dell'Alto Bregai” ice cave (Lecco, Italy). *Theor. Appl. Karstol.* 17, 27–44 (Special Issue on Ice Caves).
- Cleary, D. M., Wynn, J. G., Ionita, M., Forray, F. L. & Onac, B. P. (2017) Evidence of long-term NAO influence on East-Central Europe winter precipitation from a guano-derived $\delta^{15}\text{N}$ record. *Scientific Reports* 7, 1–8.
- Constantin, S., Bojar, A., Lauritzen, S., Lundberg, J., 2007. Holocene and Late Pleistocene climate in the sub-Mediterranean continental environment: A speleothem record from Poleva Cave (Southern Carpathians, Romania). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 243, 322–338. doi:10.1016/j.palaeo.2006.08.001.
- Corella J.P, Stefanova, V., Anjourni, AE., Rico, E., Giral, S., Moreno, A. Plata-Montero, A., Valero – Garcéa, BL. (2013) A 2500-year multi-proxy reconstruction of climate and human activities in northern Spain: The Lake Arreo record. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 386, 555-568.
- Cox, D. R. & Lewis, P. A. W. (1966) The Statistical Analysis of Series of Events. *Ann. Math. Statist.* 6, 1852–1853.
- Cristea, G., Cuna, S.M., Fărcaș, S., Tanțău, I., Dordai, E., Magdas, D., 2013. Carbon isotope composition as indicator for climatic changes during the middle and late Holocene in a peat bog from Maramures Mountains (Romania). *The Holocene* 24, 15–23. doi:10.1177/0959683613512166.
- Crowley, T. J. (2000), Causes of Climate Change Over the Past 1000 Years, Vol. 289, *Science*, 270-277, DOI: 10.1126/science.289.5477.270.
- Dansgaard, W. (1964) Stable isotope in precipitation. *Tellus*, 16, 436 – 438.

- Dima, M. & Lohmann, G. (2010) Evidence for two distinct modes of large-scale ocean circulation changes over the last century. *Journal of Climate* 23, 5–16.
- Drăgușin, V., Staubwasser M., Hoffmann, D. L., Ersek V. Onac, B. P., Vereș, D. (2014) Constraining Holocene hydrological changes in the Carpathian-Balkan region using speleothem $\delta^{18}\text{O}$ and pollen based temperature reconstructions. *Clim. Past.* 10, 1363–1380, doi:10.5194/cp-10-1363-2014.
- Drăgușin, V., Balan S., Blamart, D. et al. (2017) Transfer of environmental signals from surface to the underground at Ascunsă Cave, Romania, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 5357-5373.
- Fărcaș, S., Tanțău, I., Mîndrescu, M., Hurdu, B. (2013) Holocene vegetation history in the Maramureș Mountains (Northern Romanian Carpathians). *Quaternary International*, 293, 92-104.
- Feurdean A, Perșoiu A, Pazdur A et al. (2011) Evaluating the palaeoecological potential of pollen recovered from ice in caves: a case study from Scarisoara Ice Cave, Romania. *Review of Palaeobotany and Palynology* 165: 1-10.
- Florescu, G. et al. (2017) Last 1000 years of environmental history in Southern Bucovina, Romania: A high resolution multi-proxy lacustrine archive. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 473, 26–40.
- Forray, FL., Onac, BP. et al. (2015) A Late Holocene environmental history of a bat guano deposit from Romania: An isotopic, pollen and microcharcoal study, *Quaternary Science Reviews* 127, DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.05.022
- Fórizs, I., Kern, Z., Szántó, Zs., Nagy, B., Palcsu, L., Molnár, M. (2004) Environmental isotopes study on perennial ice in the Focul Viu Ice Cave, Bihor Mountains, Romania. *Theoretical and Applied Karstology* 17, 61-69.
- Gaiță, S. (2007) Contribuții la realizarea etalonului primar al unității de temperatură în domeniul cuprins între punctul triplu al argonului (-189,344 2 °C) și punctul de solidificare al argintului (961,78 °C), <http://www.temperature.ro/Cuprins.html>.
- Haliuc, A., Veres, D., Brauer, A., Hubay, K., Hutchinson, S.M., Begy, R., and Braun, M.: Palaeohydrological changes during the mid and late Holocene in the Carpathian area, central-eastern Europe, *Global Planet. Chang.*, 152, 99–114, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.02.010>, 2017.
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., Lo, K. (2010) Global surface temperature change, *Rev. Geophys.*, 48, RG4004, doi:10.1029/2010RG000345.
- Holmlund, P., Onac, B.P., Hansson, M., Holmgren, K., Morth, M., Nyman, M., Perșoiu, A. (2005) Assessing the palaeoclimate potential of cave glaciers: the example of the Scarisoara Ice Cave (Romania). *Geografiska Annaler A* 87, 193-201.
- Holzhauser, H., Magny, M., Heinz, J. & Chrono-ecologie, L. De. (2005) Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. 6, 789–801.
- Hughes, M. K. and Ammann C. M. (2009) The future of the past: an earth system frame work for high resolution paleoclimatology: editorial essay. *Climate Change*, 94, 247-259.
- IPCC (2007) *Climate Change (2007) Contribution of Working Groups I, to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Pachauri, R.K. and A. Reisinger (eds.)]. Geneva, Switzerland
- Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Ionita, M., Rimbu, N., Lohmann, G. (2011) Decadal variability of the Elbe River streamflow. *International Journal of Climatology* 31, 22–30.
- Ionita, M., **Bădăluță C.-A.**, Scholz, P. & Chelcea, S. (2018) Vanishing river ice cover in the lower part of the Danube basin-signs of a changing climate. *Scientific Reports* 8, 1–12
- Jones, P. D., Osborn, T. J., & Briffa, K. R. (2001). The evolution of climate over the last millennium. *Science*, 292(5517), 662-667. Kendall, Carol, Caldwell, Eric, A., (1998) *Isotope tracers in catchment hydrology*, Elsevier, ISBN: 978-0-444-81546-0.

Jones, P.D., K.R. Briffa, T.J. Osborn, J.M. Lough, T.D. van Ommen, B.M. Vinther, J. Luterbacher, E.R. Wahl, F.W. Zwiers, M.E. Mann, G.A. Schmidt, C.M. Ammann, B.M. Buckley, K.M. Cobb, J. Esper, H. Goosse, N. Graham, E. Jansen, T. Kiefer, C. Kull, M. Küttel, E. Mosley-Thompson, J.T. Overpeck, N. Riedwyl, M. Schulz, A.W. Tudhope, R. Villalba, H. Wanner, E. Wolff, and E. Xoplaki, 2009: High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: A review of current status and future prospects. *The Holocene*, 19, 3-49, doi:10.1177/0959683608098952.

Karl, T.R., Arguez, A., Huang, B., Lawrimore, J.H., McMahon, J.R., Menne, M.J., Peterson TC., Vose RS., Zhang, H-M. (2015) Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus. *Science*, Vol. 348, Issue 6242, pp. 1469-1472. DOI: 10.1126/science.aaa5632.

Kendall, Carol, Caldwell, Eric, A., (1998) *Isotope tracers in catchment hydrology*, Elsevier, ISBN: 978-0-444-81546-0.

Kern, Z., Fórizs, I., Nagy, B., Kázmér, M., Gál, A., Szántó, Z., Palcsu, L., Molnár, M., (2004). Late Holocene environmental changes recorded at Ghețarul de la Focul Viu, Bihor Mountains, Romania, *Theoretical and Applied Karstology*, 17, pp. 51–60.

Kern, Z., Molnár, M., Svingor, É., Perșoiu, A., & Nagy, B. (2009). High-resolution, well-preserved tritium record in the ice of Bortig Ice Cave, Bihor Mountains, Romania. *The Holocene*, 19(5), 729–736. doi:10.1177/0959683609105296.

Kern, Z., Fórizs, I., Perșoiu, A., Nagy, B. (2010) Stable isotope study of water sources and of an ice core from the Bortig Ice Cave, Apuseni Mountains, Romania. *Data of glaciological studies* 107, 175-182.

Luetcher, M., Jeannin, P. Y. (2004) A process-based classification of alpine ice caves, *Theoretical and Applied Karstology*, 17, 5–10.

Luetscher, M., Borreguero, M., Moseley, G. E., Spötl, C. and R. L. Edwards (2013) Alpine permafrost thawing during the Medieval Warm Period identified from cryogenic cave carbonates, *The Cryosphere*, 7, 1073–1081.

Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M. & Wanner, H. (2004) European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends, and Extremes since 1500. *Science* 303, 1499–1503.

Maggi, V., Turri, S., Bini, A., Udisti, R. (2008), 2500 Years of history in Focul Viu Ice Cave, Romania, In: Kadebskaya, O., Mavlyudov, B., Patunin, M. (Eds.), *Proceedings of the 3rd International Workshop on Ice Caves, Kungur Ice Cave, Russia*. Mining Institute of Ural, Perm State University, Russia, pp. 11–15

Mann, M. E., (2002) The Value of Multiple Proxies, in *Perspectives: Climate reconstruction din Science Compass*, Science Vol 297, 1481-1482.

Mann, M.E., Z. Zhang, S. Rutherford, R. Bradley, M.K. Hughes, D. Shindell, C. Ammann, G. Faluvegi, F. Ni. (2009) Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science*, 326, 1256-1260, doi:10.1126/science.1177303.

Mavlyudov, B. (2018) Ice Genesis, Morphology and Dynamics, chapter in *Ice Caves*, 33-96.

Morice, C.P., Kennedy, J.J., Rayner, N.A., Jones P.D. (2012) Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117, D8

Mudelsee, M. (2014) *Climate Time Series Analysis: Classical Statistical and Bootstrap Methods*. Second edition. 42, (Springer, 2014).

Murakami, H. (2006) *Blind Willow, Sleeping Woman*, Vintage, 352 pp, ISBN – 1400096081.

Onac, B.P., Constantin, S., Lundberg, J., Lauritzen, S.-E., 2002. Isotopic climate record in a Holocene stalagmite from Ursilor Cave (Romania). *J. Quat. Sci.* 17, 319–327. doi:10.1002/jqs.685.

Onac, B.P., Hutchinson, S.M., Geantă, A., Forray, F.L., Wynn, J.G., Giurgiu, A.M., Coroiu, I., (2015) A 2500-yr late Holocene multi-proxy record of vegetation and hydrologic changes from a cave guano-clay sequence in SW Romania. *Quat. Res.* doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2015.01.007.

Pauling, A., Luterbacher, J., Casty, C. & Wanner, H. (2006) Five hundred years of gridded high-resolution precipitation reconstructions over Europe and the connection to large-scale circulation. *Climate Dynamics* 26, 387–405.

Perșoiu A. (2011) Palaeoclimatic Significance of Perennial Ice Accumulations in Caves: an Example from Scarisoara Ice Cave, Romania, University of South Florida, PhD thesis.

Perșoiu, A., Pazdur, A. (2011) Ice genesis and its long-term dynamics in Scărișoara Ice Cave, Romania, *The Cryosphere* 5, 45-53.

Perșoiu, A., Onac, B.P., Perșoiu, I., (2011b) The interplay between air temperature and ice dynamics in Scărișoara Ice Cave, Romania. *Acta Carsologica*, 40/3, 445–456.

Perșoiu A., Onac, B.P. (2012) Ice in caves, In White, W., Culver, D.C. (eds.) *Encyclopedia of Caves*, Elsevier, pp. 399-404.

Perșoiu, A., Onac, B. P., Wynn, J. G., Blaauw, M., Ioniță, M., Hansson, M. (2017). Holocene winter climate variability in Central and Eastern Europe, *Scientific Reports*, 7: 1196 | DOI:10.1038/s41598-017-01397-w.

Perșoiu, A., Lauritzen S.E., (2018) *Ice Caves*, Elsevier, 753pp.

Perșoiu, I. Perșoiu, A. (2019) Flood events in Transylvania during the Medieval Warm Period and the Little Ice Age. *Holocene* 1, 85–96.

Pop, E., Ciobanu, I. (1950) Analize de polen in ghița de la Scărișoara. *Analele Academiei Republicii Populare Române, seria Geologie, Geografie, Biologie, Științe Tehnice și Agricole*, III, 23-50.

Popa, I., Kern, Z. (2009) Long-Term Summer Temperature Reconstruction Inferred from Tree-ring Records from the Eastern Carpathians, in *Climate Dynamics*, 32 (7-8): 1107-1117.

Popa I., Bouriaud O (2014). Reconstruction of summer temperatures in Eastern Carpathian Mountains (Rodna Mts, Romania) back to AD 1460 from tree-rings. *International Journal of Climatology* 34: 871-880.

Posea, G. 2002, *Geomorfologia României. Relief — tipuri tipuri, geneză, evoluție, regionale*. Editura Fundației România de Măine, București.

Rădoane, M., Nechita, C., Chiriloaei, F., Rădoane, N., Popa, I., Roibu, C., Robu, D., 2015. Late Holocene fluvial activity and correlations with dendrochronology of subfossil trunks: Case studies of northeastern Romania. *Geomorphology* 239, 142–159.

Rădoane, M., Chiriloaei, F., Sava, T., Nechita, C., Rădoane, N. (2018) Holocene fluvial history of Romanian Carpathian rivers. *Quaternary International*

Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Burr, G.S., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., McCormac, G., Manning, S., Reimer, R.W., Richards, D.A., Southon, J.R., Talamo, S., Turney, C.S.M., van der Plicht, J., Weyhenmeyer, C.E., 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon calibration curves, 0–50,000 years cal B.P. *Radiocarbon*. 51, 1111–1150.

Sharp, Z.D (2007) *Principles of stable isotope geochemistry*, Pearson Prentice Hall.

Sharp, Z.D (2017) *Principles of Stable Isotope Geochemistry*, 2nd Edition, doi:10.5072/FK2GB24S9F.

Silvestru, E. (1999) Perennial ice caves in temperate climate and its significance. *Theoretical and Applied Karstology*, 11-12:83-93.

Stein AF, Draxler RR, Rolph GD, et al. (2015) NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull Am Meteorol Soc*. 96, 2059–2077.

Tanțău, I., Feurdean, A., de Beaulieu, J. L., Reille, M., Fărcaș, S., 2014. Vegetation sensitivity to climate changes and human impact in the Harghita Mountains (Eastern Romanian Carpathians) over the past 15 000 years. *Journal of Quaternary Science*, 29(2), 141-152.

Tămaș, T., Onac, B.P., Bojar, A.V., 2005. Lateglacial-Middle Holocene stable isotope records in two coeval stalagmites from the Bihor Mountains, NW Romania. *Geol. Q.* 49, 185–194.

Trouet, V., Esper, J., Graham, N. E., Baker, A., Scourse, J. D., Frank, D. C. Persistent Positive North Atlantic Oscillation Mode Dominated the Medieval Climate Anomaly, *Science* 324, 78 – 80 (2009); DOI: 10.1126/science.1166349.

Wirth, S. B., Glur, L., Gilli, A. & Anselmetti, F. S. (2013) Holocene flood frequency across the Central Alps - solar forcing and evidence for variations in North Atlantic atmospheric circulation. *Quaternary Science Reviews* **80**, 112–128.

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview>